



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

สาขา

ฟิสิกส์

ภาควิชา

เรื่อง สมบัติเชิงสเปกตรัมของปั๊มสำหรับการผลิตโฟตอนจากกระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดเองแบบที่ 2

Spectral Properties of Pump for Photons Generation from Type-II Spontaneous Parametric Down Conversion Process

นามผู้วิจัย นายอรรถพล เจริญกุลวณิช

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา, Dr.rer.nat.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา, Dr.rer.nat.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

สมบัติเชิงสเปกตรัมของปั๊มสำหรับการผลิตโฟตอนจากกระบวนการแปลงผันลงอิง
พารามิเตอร์แบบเกิดเองแบบที่ 2

Spectral Properties of Pump for Photons Generation from Type-II Spontaneous
Parametric Down Conversion Process

โดย

นายอรรถพล เจริญกุลวณิช

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อรรถพล เจริญกุลวณิช 2557: สมบัติเชิงสเปกตรัมของบี้มสำหรับการผลิตโฟตอนจาก
กระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดเองแบบที่ 2 ปริญญาวิทยาศาสตร
มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา, Dr.rer.nat. 66 หน้า

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ศึกษาสมบัติเชิงสเปกตรัมของบี้มที่เป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์สำหรับ
การผลิตโฟตอนจากกระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดเองแบบที่ 2 จากการศึกษา
พบว่า เมื่อเพิ่มความต่างศักย์จะทำให้ความยาวคลื่นและความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของพีคของบี้มมีค่า
เพิ่มขึ้น โดยความยาวคลื่นที่ความต่างศักย์ 560, 760 และ 960 มิลลิโวลต์ เท่ากับ 404.95, 405.74
และ 406.26 นาโนเมตร ตามลำดับ และความกว้างของพีค เท่ากับ 1.57, 2.12 และ 2.48 นาโนเมตร
ตามลำดับ จากการศึกษายังพบอีกว่า ที่ความต่างศักย์ 560 มิลลิโวลต์ เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการ
ผลิตโฟตอน เนื่องจากสามารถผลิตจำนวนโฟตอนเดี่ยวได้มากที่สุด โดยบริเวณที่คู่โฟตอนมา
ซ้อนทับจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยมีจำนวนโฟตอนเฉลี่ย 670 โฟตอนต่อ
วินาทีและไม่มีโพลาไรเซชัน กล่าวคือมีสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันเฉลี่ยประมาณ 0.92
และค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันเฉลี่ยประมาณ 0.01

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Attapon Charoenkunlawanit 2014: Spectral Properties of Pump for Photons Generation from Type-II Spontaneous Parametric Down Conversion Process. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Assistant Professor Surasak Chiangga, Dr.rer.nat. 66 pages.

This thesis studies spectral properties of pump as a function of supplied voltage for photons generation from Type-II spontaneous parametric down conversion (SPDC) process. It is found that when supplied voltage is increased, the pump wavelength and the full width at half maximum (FWHM) of the pump increase, namely, the supplied voltage of 560, 760 and 960 millivolts the measured wavelength are 404.95, 405.74 and 406.26 nanometer, respectively, with FWHM of 1.57, 2.12 and 2.48 nanometer, respectively. This result shows that the potential difference of 560 millivolts is suitable for production of photons due to it gives maximum photons generation. It is found that a region the photon pairs overlap has diameter of about 1 millimeter and average photons of 670 Hertz and the photons are un-polarized photons, namely, the visibility of polarization is about 0.92 and the uncertainty of visibility is about 0.01.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เชียงกา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ช่วย
อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
รวมทั้งช่วยตรวจและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อัน
เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่คุณพ่อ คุณแม่
ที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจ จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

อรรถพล เจริญกุลวณิช

กรกฎาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	25
อุปกรณ์	25
วิธีการ	26
ผลและวิจารณ์	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	47
สรุป	47
ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	49
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งานเครื่องตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว	51
ภาคผนวก ข อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	57
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดจากกระบวนการไม่เชิงเส้นลำดับที่สอง	7
2 แสดงเวกเตอร์โจนส์สำหรับแสงที่เดินทางไปในทิศ z และเมทริกซ์โจนส์สำหรับโพลาไรเซอร์	22
3 แสดงผลการคำนวณค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ	43
4 แสดงผลการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ	44
5 แสดงผลการคำนวณค่าสภาพมองเห็นได้และค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันของโฟตอนเดี่ยวที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ	45

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงลักษณะของโคนที่เกิดจากกระบวนการ SPDC แบบ Type-I	10
2	แสดงลักษณะของโคนที่เกิดจากกระบวนการ SPDC แบบ Type-II	10
3	แสดงลักษณะของโคนที่เกิดจากกระบวนการ SPDC แบบ Collinear Type-II	11
4	แสดงไดอะแกรมของปรากฏการณ์ walk – off ของลำแสงปกติและลำแสงพิเศษเนื่องจากการเกิดหักเหสองครั้งในผลึกหักเหสองแนว	16
5	แสดงวิธีการหาดัชนีหักเหในผลึกแกนเดียวแบบลบ (negative uniaxial crystal)	18
6	แสดงแผนภาพโพลาริเซชันของคลื่นและทิศการแพร่กระจายของคลื่นสำหรับ SHG ที่มีการเข้าคู่เฟสแบบ Type-I และ Type-II	19
7	แสดงแผนภาพการจับวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับวัดสเปกตรัมของปั๊ม	28
8	แสดงแผนภาพการจับวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับสร้างโพลาริเซชันของปั๊ม	30
9	แสดงแผนภาพการจับวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับสแกนรอบบริเวณจุดที่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน	31
10	แสดงแผนภาพการจับวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับวิเคราะห์โพลาริเซชันของจุดที่คู่โฟตอนมาซ้อนทับกัน	32
11	แสดงแผนภาพการจับวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับวิเคราะห์ความเป็นโฟตอนเดี่ยวของจุดที่คู่โฟตอนมาซ้อนทับกัน	33
12	แสดงแผนภาพการจับวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับศึกษาสหสัมพันธ์ทางโพลาริเซชันของคู่โฟตอน	34
13	แสดงการจับอุปกรณ์ทางแสงสำหรับศึกษาโพลาริเซชันของคู่โฟตอน	35
14	แสดงการจับอุปกรณ์ทางแสงสำหรับศึกษาสัมพันธ์ทางโพลาริเซชันของคู่โฟตอน	36
15	แสดงการจับอุปกรณ์ทางแสงสำหรับวัดคู่โฟตอน	36
16	แสดงผลการวัดสเปกตรัมของปั๊มที่ (ก) 560 mV (ข) 760 mV และ (ค) 960 mV	37
17	แสดงโพลาริเซชันของปั๊ม	39
18	แสดงผลการสแกนบริเวณจุดที่โฟตอนมีการซ้อนทับกันที่ (ก) 560 mV (ข) 760 mV และ (ค) 960 mV	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
19 แสดงผลการวิเคราะห์โพลาไรเซชันบริเวณจุดที่คู่โฟตอนมีการซ้อนทับกันที่ (ก) 560 mV (ข) 760 mV และ (ค) 960 mV	42
20 เปรียบเทียบความเป็นโฟตอนเดี่ยวที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ คือ 560 mV, 760 และ 960 mV	44
21 แสดงผลการศึกษาโพลาไรเซชันของคู่โฟตอนที่มาพร้อมกัน ในเวลา 4 นาโนวินาที	46
ภาพผนวกที่	
ข1 เลเซอร์ไดโอด รุ่น LQA405-50E ผลิตโดยบริษัท Newport	58
ข2 เลเซอร์ไครเวอ์ ผลิตโดยบริษัท Newport	58
ข3 ตัวกรองแสงสีน้ำเงินชนิดผ่านแถบความถี่ รุ่น FGB37-A ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	58
ข4 โพลาไรเซอร์เชิงเส้น รุ่น LPVIS050 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	58
ข5 โพลาไรเซอร์เชิงเส้น รุ่น 05LP-VIS-B ผลิตโดยบริษัท Newport	59
ข6 ตัวกรองแสงย่านตามองเห็นชนิดผ่านแถบความถี่ รุ่น FB810-10 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	59
ข7 แผ่นเสี้ยวคลื่นอันดับที่ศูนย์ ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	59
ข8 พลิกหักเหสองแนว ชนิด BBO ผลิตโดยบริษัท FOCtek	59
ข9 ตัวยึดเลนส์ รุ่น LH-1 ผลิตโดยบริษัท Newport	60
ข10 ตัวยึดอุปกรณ์ทางแสงเคลื่อนที่ได้ 6 ทิศทาง รุ่น K6X ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	60
ข11 ตัวยึดโพลาไรเซอร์แบบหมุนปรับได้ รุ่น RM25A ผลิตโดยบริษัท Newport	60
ข12 ตัวยึดโพลาไรเซอร์แบบหมุนปรับได้ รุ่น RSP1 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข13 ฐานวางปลอกตัวยึดอุปกรณ์ทางแสง รุ่น BA1S ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	61
ข14 ตัวยึดอุปกรณ์ทางแสง รุ่น TR20/M ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	61
ข15 ปลอกตัวยึดอุปกรณ์ทางแสง รุ่น PH3 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	61
ข16 แท่งยึดคูลูมิเนียม (Mounting Post) รุ่น P10 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	62
ข17 ฐานวางเลเซอร์ไดโอด รุ่น C1503 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	62
ข18 ตัวเลื่อนได้ 3 แกน รุ่น PT3/M ผลิตโดยบริษัท Thorlabs	62
ข19 มัลติมิเตอร์ รุ่น 112 ผลิตโดยบริษัท Fluke	63
ข20 มัลติมิเตอร์ รุ่น HP973A ผลิตโดยบริษัท Hewlett Packard	63
ข21 เส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด ผลิตโดยบริษัท Interlink	63
ข22 เครื่องตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว รุ่น SPCM-AQ4A ผลิตโดยบริษัท PerkinElmer	64
ข23 เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่ รุ่น GFG-8015G ผลิตโดยบริษัท GW Instek	64
ข24 ออสซิลโลสโคป รุ่น TDS220 ผลิตโดยบริษัท Tektronix	64
ข25 แหล่งจ่ายไฟ ชนิด 3 เอาต์พุต รุ่น GPC-3030D ผลิตโดยบริษัท GW Instek	65
ข26 เครื่องตรวจวัดความถี่ รุ่น SR620 ผลิตโดยบริษัท Rohde&Schwarz	65

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

APD	=	แอวัลแลนซ์โฟโตไดโอด (Avalanche Photo Diode)
BBO	=	ผลึกหักเหสองแนวชนิดเบต้าแบเรียมบอเรต (Beta-Barium Borate Crystal)
BF	=	ตัวกรองแสงสีน้ำเงิน (Blue Filter)
BPF	=	ตัวกรองแสงสีแดงชนิดผ่านแถบความถี่ (Bandpass Filters)
D	=	ตัวตรวจวัด (Detector)
HWP	=	แผ่นครึ่งคลื่น (Half-Wave Plate)
L	=	เลนส์ (Lens)
LD	=	เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode)
LP	=	โพลาไรเซอร์เชิงเส้น (Linear Polarizer)
LPF	=	ตัวกรองแสงสีแดงชนิดผ่านความยาวคลื่นมาก (Longpass Filters)
MMF	=	เส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (Multimode Fiber Optics)
ND	=	ตัวลดทอนความเข้มแสง (Neutral Density)
PBS	=	กระจกแยกลำแสงโพลาไรซ์ (Polarizing Beam Splitter)
POL	=	โพลาไรเซอร์ (Polarizer)
SPCMs	=	ชุดตรวจวัดความสัมพัทธ์ของโฟตอน (Single Photon Counting Modules)

สมบัติเชิงสเปกตรัมของปั๊มสำหรับการผลิตโฟตอนจากกระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดเองแบบที่ 2

Spectral Properties of Pump for Photons Generation from Type-II Spontaneous Parametric Down Conversion Process

คำนำ

ในการศึกษาฟิสิกส์ของแสงนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับโฟตอน (photon) พบว่ามีหลายกระบวนการที่มีความสำคัญและได้รับความสนใจ หนึ่งในนั้น คือ กระบวนการผลิตคู่โฟตอน (photon pairs) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในสาขาฟิสิกส์ของแสงว่า “กระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดเอง (spontaneous parametric down conversion process: SPDC)” โดยกระบวนการดังกล่าวจะใช้แสงเลเซอร์ในช่วงตามองเห็น (visible light) ตกกระทบลงบนตัวกลางที่เป็นผลึกหักเหสองแนว (birefringence crystal) ที่มีการเข้าคู่เฟส (phase matching) เมื่อแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในตัวกลาง จะเกิดการหักเหเป็นสองแนว โดยแต่ละแนวของแสงที่ออกมาจากตัวกลางจะมีความยาวคลื่นมากขึ้น และเป็นสองเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ นักวิทยาศาสตร์เลยมองว่าแสงซึ่งเป็นกลุ่มก้อนพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน สามารถผลิตเป็นคู่โฟตอนได้ และการผลิตคู่โฟตอนดังกล่าวเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน (law of conservation of energy)

เนื่องจากการนำกระบวนการ SPDC มาใช้ศึกษานั้นต้องใช้ความละเอียดอ่อนเป็นอย่างมาก กล่าวคือ ในการผลิตคู่โฟตอนความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ใช้จะต้องเหมาะสมกับตัวกลางที่ได้รับการออกแบบ ทั้งนี้ หากเลือกใช้ความยาวคลื่นไม่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการผลิตคู่โฟตอนก็จะลดน้อยลง และส่งผลต่อสมบัติด้านอื่นๆ ของคู่โฟตอนที่ผลิตได้ เช่น สมบัติทางโพลาไรเซชัน หรือลักษณะของจุดที่คู่โฟตอนมาซ้อนทับกัน เป็นต้น

ดังนั้น วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงสนใจศึกษาผลของเลเซอร์ไดโอดที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ คือ 560, 760 และ 960 มิลลิโวลต์ ต่อผลึกไม่เชิงเส้นชนิดเบต้าแบเรียมโบเรต (beta barium borate: BBO) แบบที่ 2 (Type-II) ซึ่งถูกตัดมาให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยในการศึกษาจะตรวจวัดความยาวคลื่น และความกว้างของสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอดที่ใช้ด้วยชุดตรวจวัดสเปกตรัมรุ่น HR4000CG-UV-NIR เพื่อให้ได้ความยาวคลื่นที่เหมาะสม และใช้มอดูลตรวจนับ

โฟตอนเดี่ยว (single photon counting modules) รุ่น SPCM-AQ4C ตรวจสอบนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นจาก
กระบวนการ SPDC



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดเอง
2. เพื่อศึกษาผลของสเปกตรัมของปั๊มต่อคู่โฟตอนที่ผลิตขึ้น



การตรวจเอกสาร

Timothy *et al.* (1997) เสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคู่โฟตอนที่มีความพัวพันกัน (entangle) โดยคู่โฟตอนเกิดจากกระบวนการ SPDC ที่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบพัลส์ที่มีช่วงความกว้างไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้อาจทำให้สามารถแยกคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ต่างกันในผลึกตัวกลาง และศึกษาการลดผลอันเนื่องมาจากการแทรกสอดของสองโฟตอนใน 2 กรณี คือ การเข้าคู่เฟสแบบที่ 1 และแบบที่ 2 โดยพบว่าในกรณีของการเข้าคู่เฟสแบบที่ 2 สามารถกำจัดปัญหาดังกล่าว โดยการเลือกวัสดุ และความยาวคลื่นที่เหมาะสม

Anstett *et al.* (2001) ศึกษาการลดทอนความกว้างของสเปกตรัม การสะท้อนกลับของแสง และการลู่ออกของลำแสงจากผลึก (Beta Barium Borate – Optical Parametric Oscillator: BBO-OPO) ซึ่งเข้าคู่เฟสแบบที่ 2 โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 355 นาโนเมตรที่ให้สัญญาณแบบพัลส์ตกกระทบผลึก BBO จากศึกษาในเชิงทฤษฎีบ่งบอกว่าการเข้าคู่เฟสแบบที่ 2 กับแสงที่ยิ่งเข้าไปควรทำในเวลาเดียวกันกับการลดความกว้างของสเปกตรัม และการลู่ออกของแสงที่ให้สัญญาณแบบพัลส์ คำกล่าวข้างต้นเป็นการทำนายเพื่อยืนยันผลในการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่าช่วงความกว้างของสเปกตรัมถูกลดไปมากกว่า 20 นาโนเมตร หรือน้อยกว่า 0.1 นาโนเมตร และการลู่ออกพร้อมกันของคลื่นที่มีสัญญาณแบบพัลส์นั้น หน้าคลื่นถูกลด 5 ถึง 10 มิลลิเมตรเดียน อีกทั้งการลู่ออกแบบน้อยๆ และการลดช่วงความกว้างมีผลต่อความถี่ของแสงที่ยิ่งเข้าไป 5 นาโนเมตร และ 7 มิลลิเมตรสำหรับแสงที่ออกมาจากผลึก

Kim *et al.* (2002) ศึกษาการผลิต และวิศวกรรมเชิงสเปกตรัมของสถานะพัวพันทางโพลาไรเซชันแบบพัลส์ ในการศึกษาพบว่า สถานะทางควอนตัมของคู่โฟตอนที่เกิดจากกระบวนการ SPDC เข้าคู่เฟสแบบที่ 2 ให้สัญญาณแบบพัลส์นั้นมีความเชื่อมโยงกับความพัวพันทางโพลาไรเซชัน ผลดังกล่าวทำให้เชื่อว่ามีผลต่อเวลาของแสงที่ยิ่งเข้าไป และข้อมูลการแยกสเปกตรัมของสองโฟตอน ในการศึกษาวิศวกรรมเชิงสเปกตรัมได้ใช้เทคนิคที่แตกต่างเพื่อกำจัดข้อมูลที่ผิดอันเนื่องมาจากผลของความไม่สอดคล้องกัน (decoherence) นอกจากนี้วิศวกรรมเชิงสเปกตรัมยังให้ความหมายสำหรับการผลิตสถานะที่มีความพัวพันกันทางโพลาไรเซชันด้วยลักษณะทางสเปกตรัมที่แตกต่างกันออกไป นั่นคือ สถานะที่มีความสัมพันธ์กันเชิงความถี่และไม่มี ความสัมพันธ์กันเชิงความถี่ พบว่า สถานะดังกล่าวมีประโยชน์เป็นอย่างมากในการทดลองทาง

สารสนเทศเชิงควอนตัม (quantum information) และการประยุกต์ทางมาตรวิทยาเชิงควอนตัม (quantum metrology)

Lee *et al.* (2005) ศึกษาผลของการโพกัสแสงที่ยิ่งเข้าไปในกระบวนการ SPDC ซึ่งมีการเข้าคู่เฟสแบบที่ 2 โดยเป็นทดลองการเปลี่ยนแปลงจากคลื่นระนาบซึ่งมีการโพกัสแสงที่ยิ่งเข้าไปเป็นแบบอะนาล็อก นั่นคือ เป็นการเปลี่ยนแสงที่ยิ่งเข้าไปจากคลื่นต่อเนื่อง (continuous wave) ไปเป็นคลื่นแบบพัลส์ (pulse) จากผลการทดลองพบว่า การโพกัสแสงที่ยิ่งเข้าไปก่อให้เกิดการกระจายของแสงที่ไม่สมมาตรเกิดขึ้นทั้งในส่วนของรังสีปกติ (ordinary ray) และรังสีพิเศษ (extraordinary ray) แต่แทบจะไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของความพัวพันถ้าเลือกใช้ตัวกรองแสงเชิงพื้นที่ (spatial filters) ที่เหมาะสม

Yoonshik *et al.* (2006) ศึกษาผลของการกำจัดการกระจายตัวของสเปกตรัมของโฟตอนที่เกิดจากกระบวนการ SPDC โดยใช้ตัวกลางที่เป็นผลึกหักเหสองแนวเข้าคู่เฟสแบบที่ 2 มาใช้ในการศึกษาสเปกตรัมความถี่ของโฟตอน พบว่าในการกำจัดหรือเพิ่มการกระจายตัวของสเปกตรัมความถี่ของโฟตอนสามารถทำให้เกิดการสมมาตร (symmetric) และอสมมาตร (asymmetric) ที่สอดคล้องกับความถี่ signal และความถี่ idler ได้ จากการศึกษาพบว่า อัตราการผลิตโฟตอนเดี่ยวสามารถเพิ่มการกำจัดการกระจายตัวออกได้ และยังพบว่าอันตรกิริยาการกระจายตัวของคลื่นสามขบวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการ SPDC อาจจะมีผลกับการแยกแยะไม่ออกระหว่างสองโฟตอนและความพัวพันกันเชิงความถี่ในเส้นทางที่ต่างกัน

Poh *et al.* (2007) ศึกษาสเปกตรัมของความพัวพันทางโพลาริเซชันในกระบวนการ SPDC ที่ส่งไปพร้อมกัน จากการศึกษาพบว่า โฟตอนที่มีความพัวพันกันทางโพลาริเซชันมีประสิทธิภาพที่ทำให้สถานะของเบลล์ (Bell states) มีค่าความถูกต้องสูง เมื่อผ่านกระบวนการ SPDC ที่มีการเข้าคู่เฟสแบบที่ 2 และใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ให้สัญญาณแบบพัลส์ยังผ่านช่องแคบ พบว่า แสงที่ให้สัญญาณเป็นพัลส์ในระดับเฟมโตวินาที (femtosecond) จะให้โฟตอนจำนวนมากที่เวลาแน่นอน และการกรองสเปกตรัมจะทำให้ได้ความพัวพันกันทางโพลาริเซชันที่มีคุณภาพสูง แต่เป็นการลดทอนประสิทธิภาพในการเลือกคู่โฟตอน จากการทดลองส่งคู่โฟตอนที่มีสหสัมพันธ์กันทางโพลาริเซชันจากแหล่งกำเนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่น และการกระจายตัวของ

สเปกตรัมสูง เพื่อหาค่าความแน่นอนของสหสัมพันธ์ทางโพลาริเซชัน พบว่า แสงที่ออกมาจากตัวกลางสองแนวเกิดการเสียสมดุลของสเปกตรัมระหว่างการกระจายตัว ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการลดทอนคุณภาพของความพัวพัน ดังนั้น การวัดสเปกตรัมทำให้สามารถคาดเดาได้ว่าสหสัมพันธ์ทางโพลาริเซชันเป็นทางเลือกหนึ่ง เมื่อไม่นำตัวแปรความถี่ของคู่โฟตอนมาคิด

Daniel (2009) ศึกษาโฟตอนคู่ (twin photon) ซึ่งเกิดจากกระบวนการ SPDC โดยโฟตอนดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดในทางโทรขนส่งเชิงควอนตัม (quantum teleportation) ได้ อันเนื่องมาจากความเสถียรทางโพลาริเซชันของความพัวพันนั้นมีค่าสูงพอ แต่อย่างไรก็ตาม ความเสถียรดังกล่าวขึ้นอยู่กับสเปกตรัมของแสงที่ยิงเข้าไป และโครงสร้างทางธรรมชาติของผลึกที่ใช้เป็นตัวกลาง ในการศึกษาได้นำวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical calculation) มาใช้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าช่วงความกว้าง (width) ของสเปกตรัมของแสงที่ยิงเข้าไป และธรรมชาติของผลึกหักเหสองแนวมีผลกับมุม (degree) ของโพลาริเซชันของโฟตอนคู่ที่สร้าง

Spasibko *et al.* (2012) ศึกษาสมบัติของสเปกตรัมจากกระบวนการ PDC ที่อัตราการขยายสูง พบว่ากระบวนการ PDC ที่อัตราการขยายสูง (high gain) สามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีการบีบอัดในสูญญากาศได้ ซึ่งเป็นสถานะของแสงในระดับมหภาพและได้รับความสนใจในการประยุกต์ใช้ในทางสารสนเทศเชิงควอนตัม (quantum information) โดยศึกษาสมบัติของสเปกตรัมที่เกิดจากกระบวนการดังกล่าว 2 ลักษณะ คือ ความเข้มของสเปกในช่วงกว้างและสหสัมพันธ์ของสเปกตรัมในช่วงกว้าง ในทางทฤษฎี พบว่าความกว้างของสเปกตรัมที่อัตราการขยายสูงๆ เพิ่มขึ้น 27% เมื่อเทียบกับกระบวนการ PDC ที่อัตราการขยายต่ำๆ บันทึกความถี่และสหสัมพันธ์ได้จากการวัดการลดทอนของเสียงในกระบวนการ PDC ที่ความเข้มต่างๆ กัน และหลายช่วงความยาวคลื่น

1. กระบวนการ SPDC

กระบวนการ SPDC ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการผลิตโฟตอน ถึงแม้ว่ากระบวนการดังกล่าวจะสามารถเข้าใจได้ในแง่ของกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) ก็ตาม แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวก็เทียบได้กับพลศาสตร์ไฟฟ้าแบบเก่า (classical electrodynamics) โดยกระบวนการการเกิดแสงที่ความถี่เป็น 2ω จากแสงเข้าที่ความถี่ ω จะนำไป

ตามกฎอนุรักษ์พลังงานโฟตอนสองโฟตอนที่ตกกระทบตัวกลางจะถูกดูดกลืนและเกิดเป็นโฟตอนที่มีความถี่ลดลง

สำหรับตัวกลางที่เป็นแอนไอโซทรอปิก (anisotropic medium) โพลาริเซชันของแสงที่เคลื่อนที่อยู่ในตัวกลางจะถูกพิจารณาเป็นผลรวมของสนามไฟฟ้าภายในตัวกลางดังนี้

$$P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \chi^{(3)}E^3 + \dots \quad (1)$$

เมื่อ P คือ โพลาริเซชันภายในตัวกลาง

χ คือ ค่าสภาพซึมซับได้ทางไฟฟ้า (electric susceptibility) ของตัวกลาง

E คือ สนามไฟฟ้าที่กระทำกับตัวกลาง

ในการพิจารณาเทอมที่สองของสมการ (1) เป็นต้นไป จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอะตอมและโมเลกุล ทั้งนี้ สามารถสรุปกระบวนการไม่เชิงเส้นลำดับที่สองได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดจากกระบวนการไม่เชิงเส้นลำดับที่สอง

ปรากฏการณ์	ความถี่ของแสงตกกระทบ	ความถี่ของแสงที่ผ่านออกมา
Frequency doubling	ω	2ω
Sum frequency mixing	ω_1, ω_2	$(\omega_1 + \omega_2)$
Difference frequency mixing	ω_1, ω_2	$ \omega_1 - \omega_2 $
Down conversion	ω_p	ω_s, ω_i

ในกระบวนการแปลงผันลงคลื่นที่มีความถี่สูง (strong wave) และคลื่นที่มีความถี่ต่ำ (weak wave) ที่เข้าไปในตัวกลางจะแทนด้วย ω_p และ ω_s ตามลำดับ โดยคลื่นที่มีความต่ำจะสามารถขยายความสัมพันธ์ให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของโฟตอน “ไอดีลอร์ (idler)” ได้ในรูปของผลต่างของ $\omega_i = \omega_p - \omega_s$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของกฎอนุรักษ์พลังงาน ดังนั้น $\omega_p > \omega_s, \omega_i$ ทั้งนี้ ในกระบวนการแปลงผันลงคลื่นของปั๊ม (pump wave), E^p จะอธิบายคู่กับความถี่ ω_p และเวกเตอร์คลื่น (wave vector), \vec{k}_p และคลื่นแสงสองคลื่นที่เกิดขึ้นเอง (spontaneous light wave), E^s และ E^i จะอธิบายคู่กับความถี่ ω_i และ ω_s โดยมีเวกเตอร์คลื่นเป็น \vec{k}_i และ \vec{k}_s ตามลำดับ

สำหรับผลึก BBO ที่นำมาใช้งานนั้น ความแข็งแรงของอันตรกิริยาในความไม่เป็นเชิงเส้น $\chi^{(2)} \approx 10^{-10}$ ซึ่งถือว่าน้อยกว่าเทอมที่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีขนาดเป็น $\chi^{(1)} \approx 1$ โดยเงื่อนไขที่ได้คือ $\chi^{(2)} \ll \chi^{(1)}$ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับทฤษฎีความยุ่งเหยิง (perturbation theory) สำหรับเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างปั๊ม (pump) และคลื่น SPDC ได้ ทั้งนี้ ทำให้สามารถเขียน Hamiltonian ของสถานะโฟตอนคู่ SPDC ได้เป็น

$$H_{int}(t) = 1/2 \int_V d^3x P_{NL}^{\dagger} E^P = \epsilon_0/2 \int_V d^3x [\chi_{ijk}^{(2)} E_j^-(\vec{x}, t) E_k^-(\vec{x}, t) E_i^+(\vec{x}, t) + h.c.] \quad (2)$$

เมื่อ
$$E_m^- = -i \sqrt{\frac{\hbar \omega_m}{2\epsilon_0 n_j V_q}} \int d^3k_m A(k_j) a_{k_m}^{\dagger} e^{-i(k_m \vec{x} - \omega_j t)} \hat{e}_m$$

โดยคลื่นสัญญาณ (signal wave) และคลื่นไอดีลเลอร์ (idler wave) จะถูกบรรยายอยู่ในรูป second quantization โดย signal ($m = s$) และ idler ($m = i$) และ V_q แทนด้วยปริมาตรควอนไทซ์เซชัน (quantization volume) และ $A(k_j)$ เป็นการกระจายฟังก์ชันของ SPDC ในโหมดโฟตอน หากปั๊มมีความเข้มสูง คลื่นปั๊มจะสามารถบรรยายในรูปของคลื่นระนาบเดี่ยวแบบคลาสสิก (classical monochromatic plane wave) $E_p^+ = f(\vec{r}_{\perp}) e^{i(k_p \vec{x} - \omega_p t)}$ เมื่อ $f(\vec{r}_{\perp})$ เป็นการกระจายแอมพลิจูดตามขวาง (transversal amplitude distribution)

สถานะของโฟตอนคู่ (biphoton state) อาจเขียนได้เป็น

$$|\Psi_{SPDC}\rangle = e^{-i/\hbar \int_{-\infty}^{\infty} dt H_{int}(t)} |0\rangle \approx \frac{-i}{\hbar} \int_0^{t_c, P} dt H_{int}(t) |0\rangle \quad (3)$$

เมื่อ $|0\rangle$ แทนโหมดสูญญากาศ (vacuum mode) คู่โฟตอนแบบมัลติโหมด SPDC จะถูกปล่อยออกมาสอดคล้องกัน (coherent) ที่เวลาในการปล่อยต่างกันตรงที่เวลาในการเกิดอันตรกิริยาของคลื่นปั๊ม (pump wave) ยังคงสั้นกว่าเวลาที่สอดคล้องกันของโฟตอนปั๊ม (pump photons) ดังนั้นลิมิตบนและลิมิตล่างของตัวอินทิเกรตสามารถใช้แทน coherence time, $t_{c,p}$ ของโฟตอนปั๊ม และ 0 ตามลำดับ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หากพิจารณาในกรอบงานเดียวกับ second quantization กระบวนการ SPDC สามารถบรรยายเป็นการสลายตัว (decay) ของโฟตอนปั๊ม, $\hat{a}_{k_p}^{\dagger}$ ไปสู่โฟตอนในโหมด signal และ idler, $\hat{a}_{k_s}^{\dagger}$

และ $\hat{a}_{k_i}^\dagger$ ตามลำดับ นั่นคือ โฟตอนทั้งสองจะออกมาพร้อมกัน และเป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงาน และโมเมนตัม ดังสมการ (4) และ (5)

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (4)$$

$$\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \quad (5)$$

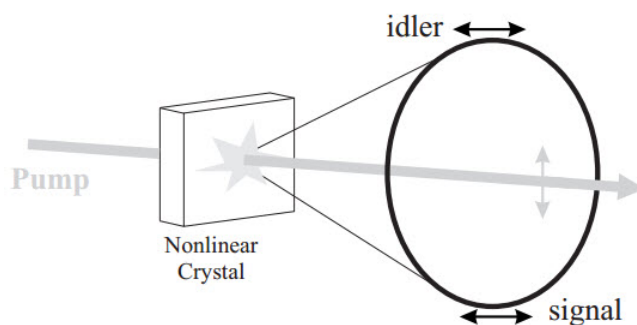
โดย $\omega_s, \omega_i < \omega_p$ และปกติเงื่อนไขในสมการ (4) และ (5) จะเรียกว่า เงื่อนไขการเข้าคู่เฟส (phase matching conditions) ทั้งนี้ การเข้าคู่เฟสระหว่างโฟตอนปั๊มและโฟตอนจากกระบวนการ SPDC จะสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์ในกรณีที่ความยาวของผลึกมีค่าไม่จำกัด (infinite) และหน้าคลื่นของปั๊มเป็นคลื่นระนาบ ด้วยเหตุนี้ สำหรับโฟตอนปั๊มแต่ละตัวที่เกิดการแปลงผันลงด้วยเวกเตอร์คลื่น \vec{k}_p การปล่อยคลื่นสัญญาณและคลื่นไอเดิลอร์ที่มีเวกเตอร์คลื่น \vec{k}_s และ \vec{k}_i จะมีเงื่อนไขการเข้าคู่เฟสเหมาะสมกันไปในแต่ละกรณี

สำหรับการแปลงผันลงที่เกิดในเงื่อนไขการเข้าคู่เฟสแบบที่ 2 หรือ Type-II แบนด์วิดท์ (bandwidth) ของคู่โฟตอนที่ออกมาจากกระบวนการ SPDC จะเพิ่มขึ้นประมาณ $v \lambda_{SPDC} \approx 40 \text{ nm}$ ขณะที่ความที่สอดคล้องกัน (coherence length) จะลดลงประมาณ $l_c \approx \lambda^2/v \lambda_{SPDC} \approx 30 \mu\text{m}$ ที่ความยาวคลื่น 805 นาโนเมตร

เนื่องจากผลึก BBO มีสมบัติเป็นแอนไอโซโทรปิก โฟตอนที่เข้าไปในผลึกตัวกลางจึงถูกพิจารณาว่ามีการหักเหเป็นสองแนว (birefringence) ดังนั้น โพลาไรเซชันของปั๊มและโฟตอนที่เกิดจากกระบวนการ SPDC จะเกี่ยวข้องกับการหมุนแกนทัศน (optical axis) ของผลึก ทิศทางของ e-ray และ o-ray ที่เป็นโพลาไรซ์จะระบุตามช่วงมุมระหว่างเวกเตอร์ของโฟตอนปั๊มและแกนทัศนของผลึก ทั้งนี้ กระบวนการ SPDC สามารถแบ่งได้สองชนิดคือ Type-I และ Type-II ตามลักษณะของโพลาไรเซชันของแสงที่กระตุ้นและแสงที่ออกมา คือ

การแปลงผันลงแบบ Type-I

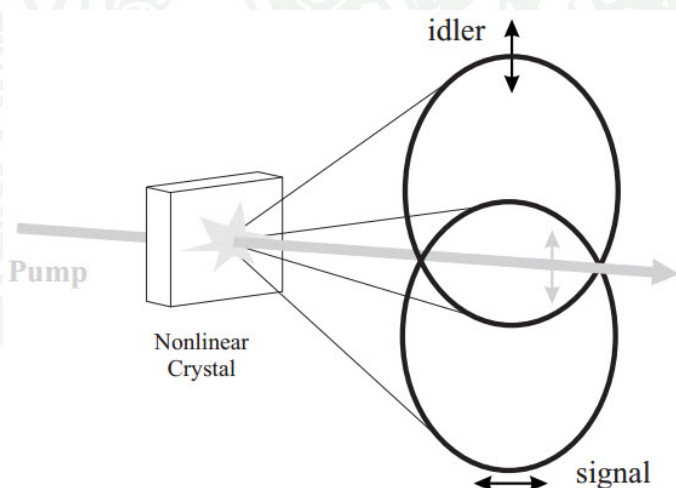
โฟตอนที่ปั๊มจะตั้งฉากกับโฟตอนที่ออกมาจากผลึกทั้งสองโฟตอน (โฟตอนที่ออกมาจากผลึกจะมีโพลาไรเซชันแนวเดียวกัน)



ภาพที่ 1 แสดงลักษณะของ โคนที่เกิดจากกระบวนการ SPDC แบบ Type-I

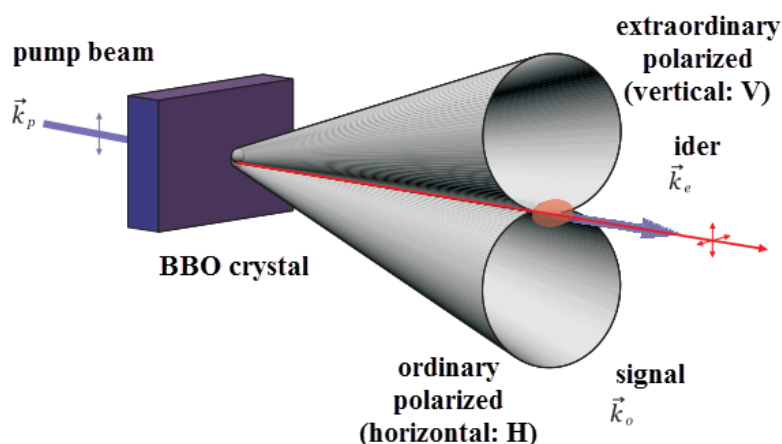
การแปลงผันลงแบบ Type-II

โฟตอนทั้งสองที่ออกมาจากผลึกจะตั้งฉากกัน



ภาพที่ 2 แสดงลักษณะของ โคนที่เกิดจากกระบวนการ SPDC แบบ Type-II

โดยขนาดของ โคนแสงจะขึ้นอยู่กับมุมของแสงที่ปั๊มและแนวแกนที่สั้นของผลึก แต่ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะศึกษาในกรณีที่เป็นการแปลงผันลงแบบ Type-II ที่มีการซ้อนทับกัน บริเวณตรงกลางจุดเดียว หรือสั้นว่า collinear นั่นคือ เวกเตอร์คลื่น \vec{k}_s และ \vec{k}_i ของโฟตอนที่เกิดจากกระบวนการ SPDC สัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ กล่าวคือ ทิศของโฟตอนสัญญาณและโฟตอนไอดีลอร์จะสมมาตรกับทิศการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์คลื่นของปั๊ม \vec{k}_p ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของโคนที่เกิดจากกระบวนการ SPDC แบบ Collinear Type-II

จากภาพจะเห็นว่าโคนมีการตัดกันเพียงจุดเดียว นั่นคือ ทิศทางของโมเมนตัมมีความสัมพันธ์กัน และโพลาไรเซชันของโฟตอน ณ จุดดังกล่าวตั้งฉากทำให้ไม่สามารถแยกแยะโพลาไรซ์ที่แน่ชัดได้ หากไม่มีการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง

ดังนั้น บริเวณจุดดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการผลิตคู่โฟตอนในกระบวนการ SPDC ได้ เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดโฟตอนที่มีความพัวพันกันซึ่งจะศึกษาในการสูงต่อไป ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะศึกษาลักษณะของจุดดังกล่าว โพลาไรเซชัน ณ บริเวณจุดนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ เป็นต้น

2. สถิติของจำนวนโฟตอนและการแจกแจงแบบปัวซอง

ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสถิติของจำนวนโฟตอนถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้กับการลดทอนสัญญาณรบกวนใน weak images และการเพิ่มประสิทธิภาพให้การส่งผ่านข้อมูลทางแสง ในระบบการติดต่อสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เช่น ข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบพัลส์ของแสง เฉพาะจำนวนเฉลี่ยของโฟตอนต่อสัญญาณเท่านั้นที่ถูกควบคุมที่แหล่งกำเนิดจำนวนโฟตอนจริงๆ ที่ถูกปล่อยออกมาจะไม่สามารถคาดเดาได้และจากพัลส์หนึ่งไปพัลส์หนึ่ง (pulse to pulse) จะมีจำนวนที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการส่งผ่านข้อมูล

การแจกแจงทางสถิติของจำนวนโฟตอนจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแหล่งกำเนิดแสงและโดยทั่วไปจะต้องแก้โดยใช้ทฤษฎีทางควอนตัมของแสง (quantum theory of light) อย่างไรก็ตาม ภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อาจมองว่าการเดินทางของโฟตอนที่เกิดขึ้นแบบสุ่มไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการใช้ของโฟตอน

พิจารณาแสงความเข้ม $I(t)$ ที่ตกลงบนตัวนับโฟโตอิเล็กทริก (photo-electric counter) พบว่า ความน่าจะเป็นในการนับที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา dt สามารถเขียนได้เป็น

$$dp(t) = \alpha I(t)dt = \alpha V^*(t)V(t)dt \quad (6)$$

โดยตัวแปร α เป็นความไวในการวัดของตัวตรวจวัด (detector) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดและช่วงสเปกตรัมของแสงตกกระทบ สมมติ ความเข้ม $I(t)$ มีค่าคงตัว ดังนั้น $1 - \Delta p(t')$ จะแทนความน่าจะเป็นที่ไม่มีกรนับเกิดขึ้นในช่วงเวลา dt' ที่เวลา t' จากนั้น สมมติว่าความอิสระของการนับโฟตอนอยู่ในรูปผลต่างของช่วงเวลาที่มีความน่าจะเป็นร่วมกับการนับที่ไม่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t ถึง $t + T$ ซึ่งเขียนในรูปผลคูณได้เป็น

$$" \prod_t^{t+T} [1 - dp(t')] " \rightarrow \exp \left[- \int_t^{t+T} dp(t') \right] \quad (7)$$

ความน่าจะเป็นในช่วงเวลา t ถึง $t + T$ ที่ไม่มีการตรวจนับเป็น

$$P_0(0, T+t, t) = \exp \left[-\alpha \int_t^{t+T} I(t')dt' \right] \quad (8)$$

ความน่าจะเป็น $P_0(1, T+t, t)$ สำหรับการนับครั้งที่หนึ่งระหว่างช่วงเวลา t ถึง $t + T$ เป็น

$$" \sum_{t'} dp(t'') \prod_t^{t+T} [1 - dp(t')] " \rightarrow \int_t^{t+T} dp(t'') \exp \left[- \int_t^{t+T} dp(t') \right] \quad (9)$$

ดังนั้น

$$P_0(1, T+t, t) = \left[\alpha \int_t^{t+T} I(t')dt' \right] \exp \left[-\alpha \int_t^{t+T} I(t')dt' \right] \quad (10)$$

ด้วยเหตุผลเดียวกัน หากมีการนับ n ครั้ง ในช่วงเวลา t ถึง $t + T$ จะสามารถเขียนได้เป็น

$$P_0(n, T+t, t) = \frac{1}{n!} \left(\alpha \int_t^{t+T} I(t') dt' \right)^n \exp \left(-\alpha \int_t^{t+T} I(t') dt' \right) \quad (11)$$

สมการข้างต้นเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ การแจกแจงแบบปัวซอง (*Poisson distribution*) หากความเข้มไม่คงที่ (เลเซอร์ในทางอุดมคติ) สมการ (11) จะเขียนแทนด้วย การแจกแจงการนับ (*counting distribution*)

โดยให้เทอมในวงเล็บของสมการ (11) แทนด้วย μ จะได้ว่า

$$\mu = \alpha \int_t^{t+T} I(t') dt' \quad (12)$$

ดังนั้น สามารถเขียนสมการ (11) ได้เป็น

$$P_0(n, T+t, t) \equiv P_0(n, \mu) = \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu} \quad (13)$$

โดยค่าเฉลี่ยในการนับ \bar{n} เป็น

$$\begin{aligned} \bar{n} &= \sum_{n=0}^{\infty} n P_0(n, \mu) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\mu^n}{(n-1)!} e^{-\mu} \\ &= \mu \end{aligned} \quad (14)$$

และค่าเฉลี่ยกำลังสองของ n เป็น

$$\begin{aligned}
\overline{n^2} &= \sum_{n=0}^{\infty} n^2 P_0(n, \mu) \\
&= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n\mu^n}{(n-1)!} e^{-\mu} \\
&= \sum_{n=0}^{\infty} [(n-1)+1] \frac{\mu^n}{(n-1)!} e^{-\mu} \\
&= \mu^2 + \mu
\end{aligned} \tag{15}$$

สมบัติสำคัญของการแจกแจงใดๆ คือ ค่าความแปรปรวน (variance)

$\sigma^2 = \overline{(n-\bar{n})^2} = \overline{n^2} - (\bar{n})^2$ ซึ่งเป็นการวัดความผันผวน (fluctuation) ของค่าเฉลี่ย \bar{n} โดยค่าความแปรปรวนสำหรับการแจกแจงแบบปัวซอง เป็น

$$\sigma^2 = \mu^2 + \mu - \mu^2 = \mu = \bar{n} \tag{16}$$

สำหรับตัวอย่าง หาก $\bar{n} = 100$ และ $\sigma = 10$ หมายความว่า หากนับโฟตอนเฉลี่ยได้ 100 ตัว จะมีค่าความไม่แม่นยำในการนับจำนวนโฟตอนแต่ละครั้งเป็น ± 10 ตัว

ทั้งนี้ วิธีที่สะดวกในการสรุปสมบัติทั้งหมดของการแจกแจง คือ การสรุปเป็นลักษณะของฟังก์ชัน ซึ่งสำหรับการแจกแจงแบบปัวซองจะนิยามโดย

$$\begin{aligned}
C_0(s, \mu) &= \sum_{n=0}^{\infty} e^{ins} P_0(n, \mu) \\
&= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{ins} \mu^n}{n!} e^{-\mu} \\
&= \exp[(e^{is} - 1)\mu]
\end{aligned} \tag{17}$$

ฟังก์ชันข้างต้นใช้อธิบายข้อมูลทั้งหมดเกี่ยวกับ $P_0(n, \mu)$

การแจกแจงจำนวนโฟตอนแบบปัวซองสามารถนำไปใช้กับเลเซอร์ในทางอุดมคติที่มีการปล่อยลำแสงแบบแสงสีเดียว (monochromatic light) ออกมาได้ และการแจกแจงดังกล่าวสอดคล้องกับสถานะทางควอนตัมของแสงที่รู้จักกันในนาม สถานะสอดคล้อง (coherent state) ทั้งนี้ การแจกแจงจำนวนโฟตอนแบบปัวซองสะดวกอย่างมากในการประมาณค่าทางสถิติของโฟตอนที่มิแหล่งกำเนิดหลายแหล่ง รวมไปถึงแสงแบบเทอร์มัลชนิดหลายโหมด (multimode thermal light)

3. การหักเหเป็นสองแนวในตัวกลางไม่เชิงเส้น

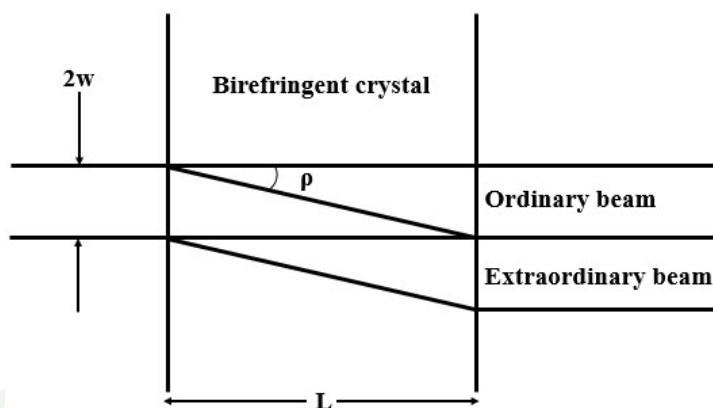
ในตัวกลางที่มีการหักเหเป็นสองแนวนั้น ทิศของคลื่นที่มีการแพร่กระจาย เช่น ทิศของเวกเตอร์คลื่น สำหรับคลื่นพิเศษ (extraordinary wave) โดยทั่วไปแล้วทิศการแพร่กระจายของคลื่นจะไม่ได้อยู่ในทิศเดียวกับทิศของพลังงานหรือของลำแสง ดังนั้น ทั้ง Type-I และ Type-II ลำแสงของคลื่นปกติ และไม่ปกติที่มีขนาดที่จำกัดจะไม่เกิดการซ้อนทับ (overlap) กันได้ โดยผลของปรากฏดังกล่าวจะแสดงให้เห็นในภาพที่ 4 ซึ่งจากภาพดูเหมือนว่าลำแสงพิเศษ (extraordinary beam) จะเดินทางหรือห่างออกไป (walk – off) จากแกนของลำแสงปกติ (ordinary beam) โดยมุม ρ ในภาพประกอบจะถูกเรียกมุม walk – off และสำหรับผลึกแกนเดียว (uniaxial crystal) สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\tan \rho = \frac{[n_e(\theta)]^2}{2} \left[\frac{1}{(n_e)^2} - \frac{1}{(n_o)^2} \right] \sin 2\theta \quad (18)$$

โดย

$$\begin{aligned} (n_o)^2 &= 2.7359 + \frac{0.01878}{\lambda^2 - 0.01822} - 0.01354\lambda^2 \\ (n_e)^2 &= 2.3753 + \frac{0.01224}{\lambda^2 - 0.01667} - 0.01516\lambda^2 \end{aligned} \quad (19)$$

สำหรับการแพร่กระจายมุม θ จะสอดคล้องกับแกนทัศน (optical axis) ของผลึกและความยาว (λ) ที่ใช้จะเป็นความยาวคลื่นของลำแสงที่ป้อนเข้าไปในผลึกไม่เชิงเส้น ซึ่งจะอยู่ในหน่วยไมโครเมตร



ภาพที่ 4 แสดงไดอะแกรมของปรากฏการณ์ walk – off ของลำแสงปกติและลำแสงพิเศษเนื่องจากการเกิดหักเหสองครั้งในผลึกหักเหสองแนว

สำหรับลำแสงที่มีรัศมี w ระยะการแยกกันของลำแสงปกติและลำแสงพิเศษในทางฟิสิกส์จะเป็น $L_p = 2w / \tan \rho$; $2w / \rho$ เช่น สำหรับลำแสงที่มีรัศมี 1 มิลลิเมตร และมีมุม walk – off เป็น 2 องศา ระยะที่ลำแสงทั้งสองจะแยกออกจากกันจะอยู่ที่ประมาณ 3 เซนติเมตร ทั้งนี้ ในทางฟิสิกส์ลำแสงที่ไม่เกิดการซ้อนทับกันจะไม่เกิดอันตรกิริยาต่อกัน ดังนั้น ผลของปรากฏการณ์ walk – off จึงมีความสำคัญและส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดการแปลงผันลงได้รับความเสียหายได้

4. มุมในการเข้าคู่เฟสสำหรับการแพร่กระจายแบบ Collinear

มุมในการเข้าคู่เฟสจะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบสเกลาร์และแบบเวกเตอร์ โดยแบบสเกลาร์จะกล่าวถึงสถานการณ์ทั้งหมดของคลื่นที่เกิดอันตรกิริยาแบบ collinear ส่วนแบบเวกเตอร์จะกล่าวถึงอันตรกิริยาของคลื่นที่ไม่ได้มีการแพร่กระจายแบบ collinear

การเข้าคู่เฟส (phase matching) หมายถึง การเข้าคู่ (matching) ของความเร็วเฟสของคลื่นที่สนใจและโพลาไรเซชันของคลื่นนั้น โดยสามารถสรุปเป็นเงื่อนไขของกระบวนการแปลงผันเชิงความถี่ได้เป็น

SHG (Second Harmonics Generation)

$$k_o + k'_o = k_{2o} \quad (20)$$

SFG (Sum Frequency Generation)

$$k_{p1} + k_{p2} = k_s \quad (21)$$

DFG (Difference Frequency Generation)

$$k_{p1} - k_{p2} = k_d \quad (22)$$

สำหรับการแพร่กระจายแบบ collinear สามารถลดรูปเงื่อนไขข้างต้นลงได้เป็น

SHG

$$n_{2\omega} - n_{\omega} = 0 \quad (23)$$

SFG

$$\omega_{p1}(n_s - n_{p1}) + \omega_{p2}(n_s - n_{p2}) = 0 \quad (24)$$

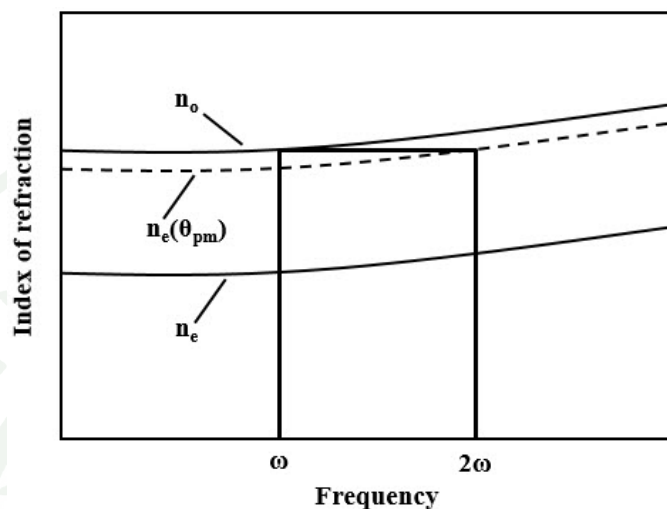
DFG

$$\omega_{p1}(n_{p1} - n_d) - \omega_{p2}(n_{p2} - n_d) = 0 \quad (25)$$

สำหรับตัวกลางที่มีการกระจายเป็นไปอย่างปกติ เช่น ตัวกลางที่ดัชนีหักเหเพิ่มขึ้นตามความถี่ โดยทั่วไปจะไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น เมื่อ $2\omega > \omega_s$, $\omega_s > \omega_{p1}$, ω_{p2} และ $\omega_{p1} > \omega_{p2} > \omega_d$ แต่ในตัวกลางที่มีการหักเหสองแนวจะสอดคล้องกับทั้งสามสมการข้างต้น

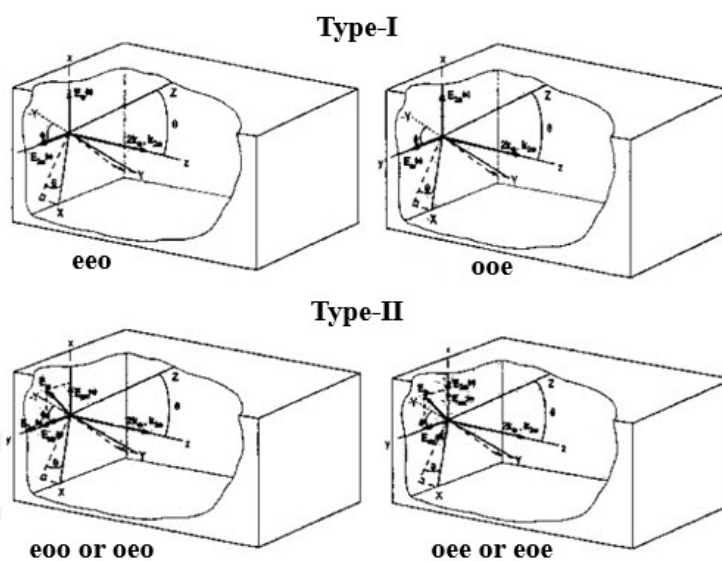
สำหรับตัวกลางที่เป็นแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) จะมีโหมดปกติของการแพร่กระจายของแต่ละความถี่อยู่สองโหมด โดยคลื่นทั้งสองขบวนนี้จะมีโพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกันและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฟสที่ต่างกัน ในผลึกแกนเดียว (uniaxial crystal) คลื่นหนึ่งจะถูกเรียกว่า คลื่นปกติ (ordinary wave) มีค่าดัชนีหักเหที่เป็น n_o โดย n_o จะไม่ขึ้นกับทิศของการแพร่กระจายของคลื่น ส่วนอีกคลื่นหนึ่งจะถูกเรียกว่า คลื่นพิเศษ (extraordinary wave) มีค่าดัชนีเป็น $n_e(\theta)$ โดย $n_e(\theta)$ จะขึ้นอยู่กับทิศการแพร่กระจายของคลื่น โดยที่มุม θ เป็นมุมที่ใช้บรรยายทิศของการแพร่กระจายของ

คลื่นซึ่งสัมพันธ์กับแกนทัศน (optical axis) ของตัวกลางที่คลื่นผ่านเข้าไป ทั้งนี้ สำหรับ SHG ที่ผลึกมี $n_e < n_o$ สามารถพิจารณาการเข้าคู่เฟสได้จากการหามุมของการแพร่กระจาย θ_{pm} ที่มี $n_o^\omega = n_e^{2\omega}$ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงวิธีการหาดัชนีหักเหในผลึกแกนเดียวแบบลบ (negative uniaxial crystal)

มุมในการเข้าคู่เฟสจะมีอยู่ 2 ประเภท คือ Type-I จะกล่าวถึงสถานการณ์ของคลื่นสองขบวนจากบีมที่มีโพลาไรเซชันเหมือนกัน และ Type-II จะกล่าวถึงคลื่นสองขบวนจากบีมที่มีโพลาไรเซชันตั้งฉากกัน โดยปกติแล้ว สำหรับ SHG จะมีบีมแค่บีมเดียว ซึ่งใน Type-I บีมจะเป็นแบบ ordinary หรือไม่ก็ ordinary ส่วนใน Type-II บีมจะถูกทำให้เป็นโพลาไรซ์เพื่อใหตั้งฉากกันอีกส่วนที่เป็น ordinary หรือ extraordinary นั่นเอง ซึ่งกรณีต่างๆ ของ SHG ทั้งแบบ Type-I และ Type-II สามารถดูได้จากภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงแผนภาพโพลาริเซชันของคลื่นและทิศการแพร่กระจายของคลื่นสำหรับ SHG ที่มีการเข้าคู่เฟสแบบ Type-I และ Type-II

ทั้งนี้ การตัดผลึกจะแสดงโพลาริเซชันและการแพร่กระจายของคลื่นที่สัมพันธ์กับแกนที่ใช้ในการทดลอง (laboratory axes) (x, y, z) และแกนที่ศูนย์กลางของผลึก (X, Y, Z) โดยปกติจะมีการกำหนดเงื่อนไขของประเภทของคลื่นที่ใช้สำหรับปั๊มและกำหนดประเภทของคลื่นที่ถูกผลิตออกมา สำหรับการเข้าคู่เฟสแบบ Type-I จะกำหนดไว้ดังนี้

Extraordinary, extraordinary, ordinary หรือเรียกย่อๆ ว่า eeo

Ordinary, ordinary, extraordinary หรือเรียกย่อๆ ว่า ooe

สำหรับการเข้าคู่เฟสแบบ Type-II จะมีการกำหนดไว้เป็น

Extraordinary, ordinary, extraordinary หรือเรียกย่อๆ ว่า eoe

Extraordinary, ordinary, ordinary หรือเรียกย่อๆ ว่า eoo

Ordinary, extraordinary, extraordinary หรือเรียกย่อๆ ว่า oee

Ordinary, extraordinary, ordinary หรือเรียกย่อๆ ว่า oeo

จากภาพที่ 6 สามารถนำมาใช้ตีความสำหรับ SHG และ DFG ได้ว่า การเข้าคู่เฟสแบบ Type-I คลื่นปั๊มทั้งสองขบวนจะอยู่ในแนวขนานกัน ส่วนการเข้าคู่เฟสแบบ Type-II คลื่นปั๊มจะตั้งฉากกับสนามเวกเตอร์ของปั๊ม ซึ่งมีเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ 4 แบบ คือ ปั๊ม 1 เป็น extraordinary ส่วน

บีม 2 เป็น ordinary ทำให้ได้เป็น eoe และ eoo หรือบีม 1 เป็น ordinary ส่วนบีม 2 เป็น extraordinary ทำให้ได้เป็น oee และ oeo นั่นเอง

มุมในการเข้าสู่เฟสสำหรับผลึกแกนเดียว สำหรับผลึกแกนเดียวนั้นจะมีแกนสมมาตรเพียงแกนเดียว โดยทั่วไปจะนิยามให้เป็นแกน Z ซึ่งจะสอดคล้องกับแกนทัศนศาสตร์ (principal optical axis) ดังนั้น ดัชนีหักเหสำคัญจะเป็น $n_x = n_y = n_o$ และ $n_z = n_e$ สำหรับผลึกแกนเดียวแบบบวก ดัชนีหักเห $n_o < n_e$ ส่วนผลึกหักเหแบบลบ $n_o > n_e$ สำหรับการแพร่กระจายมุม θ จะทำกับแกน Z โดยคลื่นพิเศษ (extraordinary wave) จะมีดัชนีหักเหเป็น

$$\frac{1}{[n_e(\theta)]^2} = \frac{\cos^2 \theta}{[n_o]^2} + \frac{\sin^2 \theta}{[n_e]^2} \quad (26)$$

โดยสมการ (19) จะใช้ร่วมกับสมการ (26) เพื่อใช้ในการมุมในการเข้าสู่เฟส สำหรับการรวมกันของ โพลาริเซชันในกระบวนการแบบ Type-I และ Type-II

5. โพลาริเซชันของแสง

เวกเตอร์แอมพลิจูดเชิงซ้อน (complex amplitude) ของคลื่นระนาบ (plane wave) \vec{A}_0

$$\vec{E}_0 = \vec{A}_0 e^{i(\omega t - kz)} \quad (27)$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบของมันได้เป็น

$$\vec{A}_0 = \begin{Bmatrix} A_{0x} e^{i\phi_x} \\ A_{0y} e^{i\phi_y} \end{Bmatrix} \quad (28)$$

สำหรับแสงที่ไม่มีโพลาไรซ์ (unpolarized light) เฟส ϕ_x และ ϕ_y จะไม่สอดคล้องกันและมีความผันผวน (fluctuation) ที่แตกต่างกัน สำหรับแสงที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้น (linearly polarized light) เวกเตอร์ทางไฟฟ้าที่อยู่ในทิศ x จะทำให้ $A_{0y} = 0$ เมื่อเวกเตอร์ \vec{E} ชี้ทำมุม α กับแกน x จะทำให้ $\phi_x = \phi_y$ และ $\tan \alpha = A_{0y} / A_{0x}$ สำหรับโพลาไรซ์แบบวงกลม (circular polarization) $A_{0x} = A_{0y}$ และ $\phi_x = \phi_y \pm \pi/2$

สถานะที่แตกต่างกันของโพลาไรเซชันสามารถแสดงลักษณะได้ด้วยเวกเตอร์โจนส์ (Jones vector) ของมัน ซึ่งมีนิยามเป็น

$$\vec{E}_0 = \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \end{Bmatrix} = |E| \cdot \begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} e^{i(\omega t - kz)} \quad (29)$$

เมื่อเวกเตอร์ปกติ (normalized vector) $\{a, b\}$ เป็นเวกเตอร์โจนส์ ในตารางที่ 2 เป็นลิสต์ (list) ของเวกเตอร์โจนส์สำหรับสถานะโพลาไรเซชันที่แตกต่างกัน สำหรับแสงที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้นและมีมุม $\alpha = 45^\circ$ สามารถเขียนเวกเตอร์แอมพลิจูด \vec{A}_0 ได้เป็น

$$\vec{A}_0 = \sqrt{A_{0x}^2 + A_{0y}^2} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = |\vec{A}_0| \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad (30)$$

สำหรับโพลาไรเซชันแบบวงกลม สามารถเขียนเวกเตอร์แอมพลิจูดได้เป็น

$$\vec{A}_0^{(\sigma^+)} = |\vec{A}_0| \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{Bmatrix} 1 \\ i \end{Bmatrix}; \quad \vec{A}_0^{(\sigma^-)} = |\vec{A}_0| \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{Bmatrix} 1 \\ -i \end{Bmatrix} \quad (31)$$

เนื่องจาก $\exp(-i\pi/2) = -i$

การเขียนเวกเตอร์โจนส์เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาแสงที่ส่งผ่านเข้าไปอุปกรณ์ทางไม่ว่าจะเป็นโพลาไรเซอร์ (polarizers) แผ่นเลี้ยวคลื่น ($\lambda/4$ plates) หรือตัวแยกลำแสง (beam splitters) เราสามารถบรรยายองค์ประกอบได้ในรูปของเมทริกซ์ขนาด 2×2 ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงเวกเตอร์โจนส์สำหรับแสงที่เดินทางไปในทิศ z และเมทริกซ์โจนส์สำหรับ
โพลาริเซอร์

เวกเตอร์โจนส์	เมทริกซ์โจนส์
<p>โพลาริเซอร์เชิงเส้น</p> <p>ทิศ x: $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$</p> <p>ทิศ y: $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$</p> <p>ทิศทำมุม α ใดๆ: $\begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix}$</p>	<p>โพลาริเซอร์เชิงเส้น</p> <p>\leftrightarrow ; $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$</p> <p>$\vee$; $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$</p> <p>$\backslash$; $\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$</p> <p>$-$; $\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$</p> <hr/> <p>แผ่นเลี้ยวคลื่น ($\lambda/4$) ที่มี slow axis อยู่ในทิศ</p> <p>x: $e^{i\pi/4} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1+i & 0 \\ 0 & 1-i \end{pmatrix}$</p> <p>$y$: $e^{-i\pi/4} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1-i & 0 \\ 0 & 1+i \end{pmatrix}$</p> <hr/> <p>แผ่นครึ่งคลื่น ($\lambda/2$)</p> <p>x: $e^{i\pi/2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$</p> <p>$y$: $e^{-i\pi/2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -i & 0 \\ 0 & +i \end{pmatrix}$</p>
<p>โพลาริเซอร์แบบวงกลม</p> <p>σ^+ : $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$</p> <p>$\sigma^-$: $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$</p>	<p>โพลาริเซอร์แบบวงกลมที่หมุนตัวหมุนไป 90 องศา</p> <p>ทิศตามเข็มนาฬิกา : $\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & +i \\ -i & 1 \end{pmatrix}$</p> <p>ทิศทวนเข็มนาฬิกา : $\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ +i & 1 \end{pmatrix}$</p>

โดยสถานะโพลาไรเซชันของแสงที่ส่งผ่านออกมาจากอุปกรณ์ทางแสงจะอยู่ในรูปผลคูณของเวกเตอร์โจนส์และเมทริกซ์โจนส์ ตามสมการด้านล่างนี้

$$\vec{E}_t = \begin{Bmatrix} E_{xt} \\ E_{yt} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} E_{x0} \\ E_{y0} \end{Bmatrix}, \quad (32)$$

เช่น แสงที่ตกกระทบเป็นแสงที่มีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นและอยู่ในทิศ x ($\alpha = 0^\circ$) หลังจากส่งผ่านออกมาจากแผ่นเลี้ยวคลื่นที่มี slow axis อยู่ในทิศ x สามารถเขียนในรูปผลคูณของเวกเตอร์โจนส์และเมทริกซ์โจนส์ได้เป็น

$$\begin{aligned} \vec{E}_t &= e^{i\pi/4} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} |E_0| \\ &= e^{i\pi/4} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} |E_0| \\ &= e^{-i\pi/4} (E_{x0} \cdot \hat{e}_x - iE_{y0} \cdot \hat{e}_y), \end{aligned} \quad (33)$$

6. สภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชัน

สภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันใช้เป็นตัวบอกความเป็นโพลาไรซ์ของจุดที่เราวิเคราะห์ โดยดูจากค่าที่คำนวณได้ เช่น หาก $V = 1$ แสดงว่าจุดที่เราวิเคราะห์มีความเป็นโพลาไรซ์ในแนวนั้นชัดเจน

ทั้งนี้ สามารถคำนวณหาค่าสภาพมองเห็นได้จากสมการ (34)

$$V = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\max} + N_{\min}} \quad (34)$$

เมื่อ N_{\max} และ N_{\min} คือจำนวนนับโฟตอนที่มากที่สุดและน้อยที่สุด ตามลำดับ

7. ความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาริเซชัน

ความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้เป็นค่าที่ใช้บอกกว่าสภาพมองเห็นได้ของโพลาริเซชันที่วิเคราะห์มาได้จากสมการ (34) มีความไม่แน่นอนที่จะอยู่ในแวนนั้นๆ เพียงใด

ทั้งนี้ สามารถคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้จากสมการ (35)

$$\sigma_V = \frac{2}{(N_{\max} + N_{\min})^2} \sqrt{N_{\max}^2 N_{\min} + N_{\min}^2 N_{\max}} \quad (35)$$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เลเซอร์ไดโอดลำแสงสีม่วงรุ่น LQA405-50E ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ผลิตโดยบริษัท NEWPORT
2. เลเซอร์ไครเวอร์ที่มาพร้อมกับเลเซอร์ไดโอด ผลิตโดยบริษัท NEWPORT
3. ตัวกรองแสงสีแดง ชนิดผ่านแถบความถี่ (Bandpass filters) รุ่น FB810-10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ผลิตโดยบริษัท THORLABS
4. ที่ยึดกระจกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว รุ่น LH-1 ผลิตโดยบริษัท NEWPORT
5. แผ่นกันแสงขนาดรูเปิดแสงกว้างสุดได้ 20 มิลลิเมตร ผลิตโดยบริษัท THORLABS
6. โพลาริเซอร์เชิงเส้นช่วงความยาวคลื่น 550-1500 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มิลลิเมตร รุ่น LPVIS050 ผลิตโดยบริษัท THORLABS
7. ตัวยึดอุปกรณ์ทางแสงที่เคลื่อนที่ได้ 6 ทิศทาง (6-Axis kinematic optic mount) ผลิตโดยบริษัท THORLABS
8. ตัวยึดโพลาริเซอร์แบบปรับมุมได้ ซึ่งสามารถบรรจุอุปกรณ์ทางแสงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว สามารถหมุนได้ 360 องศาโดยมีสเกลบอกในการหมุนที่ละ 2 องศา รุ่น RM25A ผลิตโดยบริษัท Newport
9. ที่ยึดกระจกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว รุ่น LH-2 ผลิตโดยบริษัท NEWPORT
10. ฟลิกหักเหสองแนวชนิด BBO ขนาด 5×5×1 มิลลิเมตร ผลิตโดยบริษัท FOCtek
11. โพลาริเซอร์ย่านอินฟราเรดใกล้ (Near - infrared polarizers) ความยาวคลื่น 780 -1250 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร มีช่องเปิดให้แสงผ่าน 15 มิลลิเมตร รุ่น 03 FPI 001 ผลิตโดยบริษัท MELLES GRIOT
12. ตัวยึดโพลาริเซอร์ ที่สามารถบรรจุอุปกรณ์ทางแสงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 – 20.6 มิลลิเมตร สามารถหมุนได้ 360 องศา โดยมีสเกลบอกในการหมุนที่ละ 1 องศา รุ่น 07 HPR 223 ผลิตโดยบริษัท MELLES GRIOT
13. ตัวกรองแสงสีแดงผ่านความยาวคลื่นมาก RG780 (Longpass colored glass filter) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว หนา 2 มิลลิเมตร จะให้แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 780 นาโนเมตร ผ่านได้ ผลิตโดยบริษัท THORLABS
14. ชุดตรวจวัดสเปกตรัม รุ่น HR4000CG-UV-NIR ผลิตโดยบริษัท Ocean Optics

15. ตัวทำแสงขนานหัวต่อแบบ FC ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ความยาวโฟกัส 35.30 มิลลิเมตร รุ่น F810FC-635 ผลิตโดยบริษัท THORLABS ($\lambda = 635 \text{ nm}$ FC/PC Collimation Package, NA = 0.25, f = 35.30 mm)
16. เส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด ยาว 1 เมตร ผลิตโดยบริษัท Interlink
17. ตัวยึดโพลาริเซอร์แบบปรับมุมได้ รุ่น RSP1 ที่สามารถบรรจุอุปกรณ์ทางแสงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว สามารถหมุนได้ 360 องศา โดยมีสเกลบอกในการหมุนทีละ 2 องศา ผลิตโดยบริษัท THORLABS
18. เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่น (Function generator) ความถี่ 2 เมกกะเฮิร์ต อยู่ในย่านความถี่ 0.2 Hz - 2 MHz ให้กำเนิดคลื่นรูป Sine, Triangle, Square และ TTL Pulse สามารถควบคุม DC Offset ได้ รุ่น GFG-8015G ผลิตโดยบริษัท GW instek
19. มัลติมิเตอร์ รุ่น 110 และ 189 ผลิตโดยบริษัท Fluke
20. ออสซิลโลสโคป รุ่น TDS 220 ผลิตโดยบริษัท TEKTRONIX
21. ชุดตรวจวัดความสัมพัทธ์ของโฟตอน SPCM-AQ4C มี 4 ช่อง ในการตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว โดยแต่ละช่องจะไม่ขึ้นต่อกัน ตรวจวัดคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1060 นาโนเมตร ผลิตโดยบริษัท PerkinElmer
22. แหล่งจ่ายไฟ 3 เอาต์พุต (5V / 3A fixed output) รุ่น GPC-3030D ผลิตโดยบริษัท GW instek จำนวน 2 เครื่อง
23. ชุดตรวจนับคู่โฟตอนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน รุ่น SR620 ผลิตโดย บริษัท SRS

วิธีการ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาและปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

1. การใช้งานเลเซอร์ไดโอดและเลเซอร์ไดรเวอร์
2. การจัดแนวทางเดินแสง
3. การวัดสเปกตรัมของปั๊มที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ คือ 560 mV, 760 mV และ 960 mV
4. การสร้างสถานะโพลาริเซชันของปั๊ม
5. การสแกนรอบจุดที่คู่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน
6. การวิเคราะห์โพลาริเซชันของจุดที่คู่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน
7. การวิเคราะห์ความเป็นโฟตอนเดี่ยวของจุดที่คู่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน
8. การวัดสหสัมพันธ์ทางโพลาริเซชันของคู่โฟตอน

1. การใช้งานเลเซอร์ไดโอดและเลเซอร์ไครเวอ์

1.1 ศึกษาการใช้งานเลเซอร์ไดโอดและเลเซอร์ไครเวอ์ตามคู่มือที่ให้มา

1.2 ติดตั้งเลเซอร์ไดโอด โดยนำเลเซอร์ไดโอดวางบนฐานที่สามารถปรับทิศทางได้ และยึดเลเซอร์ไดโอดไว้กับแท่งยึดอลูมิเนียมที่สามารถปรับระดับความสูงได้

1.3 กล้าสัญญาณ (Modulation) อะนาล็อก และเปิดใช้งานเลเซอร์ไดโอด โดย

1.3.1 เปิดเครื่องออสซิลโลสโคป และนำหัวต่อ BNC กล้ากับช่อง “Output 50 Ω ” ของเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่ (Function Generator)

1.3.2 เปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่ แล้วเลือกสัญญาณคลื่นรูปไซน์สี่เหลี่ยม และปรับความถี่เป็น 100 เฮิร์ตซ์ ปรับยอดสัญญาณถึงยอดสัญญาณที่อยู่ติดกัน (Peak to Peak) เป็น 560 มิลลิโวลต์ และปรับ Offset เป็น 1 โวลต์

1.4 เปิดเลเซอร์ไครเวอ์ โดยหมุนเปิดสวิตช์กุญแจที่เลเซอร์ไครเวอ์ไปในทิศทางเข็มนาฬิกาซึ่งตัวเลเซอร์ไครเวอ์จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด – ปิดของเลเซอร์ไดโอด

1.5 สังเกตค่าความต่างศักย์บนหน้าปัดของมัลติมิเตอร์ M1 และ M2 ที่ต่อไว้กับเลเซอร์ไดโอด และนำค่าที่ได้ไปเทียบกับคู่มือของเลเซอร์ไดโอด เพื่อดูว่าจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเลเซอร์ไดโอดเกินหรือไม่ หรืออุณหภูมิของเลเซอร์ไดโอดสูงหรือต่ำเพียงใด โดย

1.5.1 มัลติมิเตอร์ M1 จะแสดงผลการวัดกระแสของเลเซอร์ไดโอด โดย 1 มิลลิโวลต์ เท่ากับ 1 มิลลิแอมแปร์

1.5.2 มัลติมิเตอร์ M2 จะแสดงผลการวัดอุณหภูมิของเลเซอร์ไดโอด โดยดูอุณหภูมิได้จากการนำค่าความต่างศักย์ที่มัลติมิเตอร์วัดได้เทียบกับตารางคู่มือของเลเซอร์ไดโอด

2. การจัดแนวทางเดินแสง

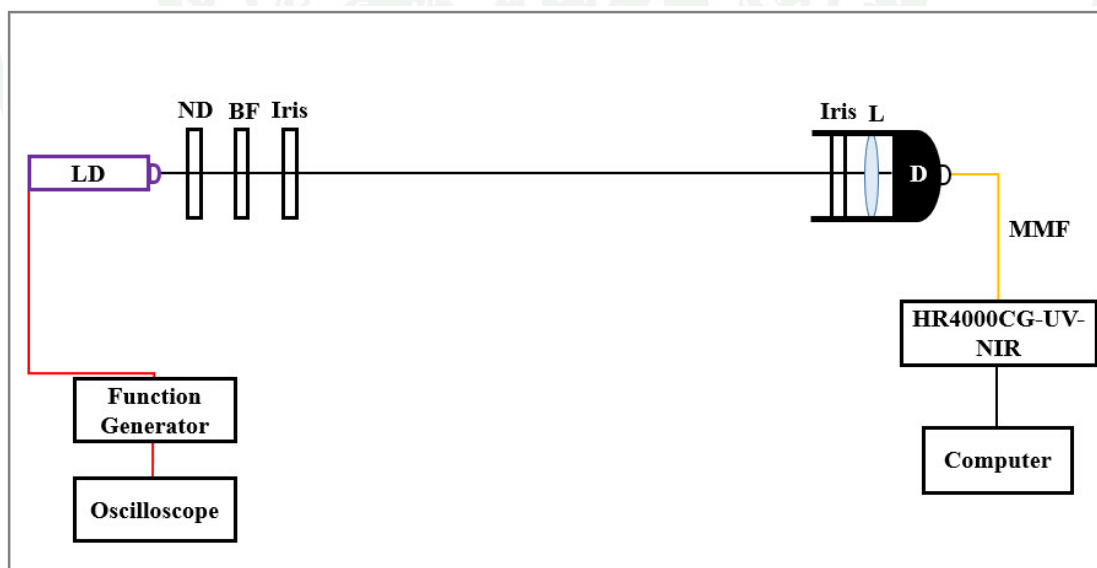
2.1 วางแนวทางเดินแสงให้มีระดับเดียวกับระนาบของโต๊ะทดลอง โดยการทำแนวระดับบนฉากรับเพื่อให้แสงตกกระทบบตรงตำแหน่งและระดับที่ต้องการ

2.2 ทดสอบว่าแสงจากเลเซอร์ไดโอดอยู่ในแนวระดับที่ต้องการแล้ว โดยการนำฉากรับไปวางไว้ที่ระยะกึ่งกลาง และระยะหลังสุดที่จะจัดวางอุปกรณ์ทางแสง หากจัดแนวทางเดินแสงได้ระดับ แสงจะต้องตกกระทบบตรงตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้บนฉากรับ

2.3 ในกรณีที่การจัดแนวทางเดินยังไม่อยู่ในแนวระดับที่ต้องการ สามารถหมุนปุ่มปรับระดับฐานวางเลเซอร์ไดโอด เพื่อให้แสงตกกระทบบตรงตำแหน่งที่ต้องการ

3. การวัดสเปกตรัมของป้มที่มีความต่างศักย์ 3 ระดับ คือ 560 mV, 760 mV และ 960 mV

ในการวัดสเปกตรัมของป้มจะจัดวางอุปกรณ์ทางแสง ดังแผนภาพด้านล่างนี้



ภาพที่ 7 แสดงแผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับวัดสเปกตรัมของป้ม

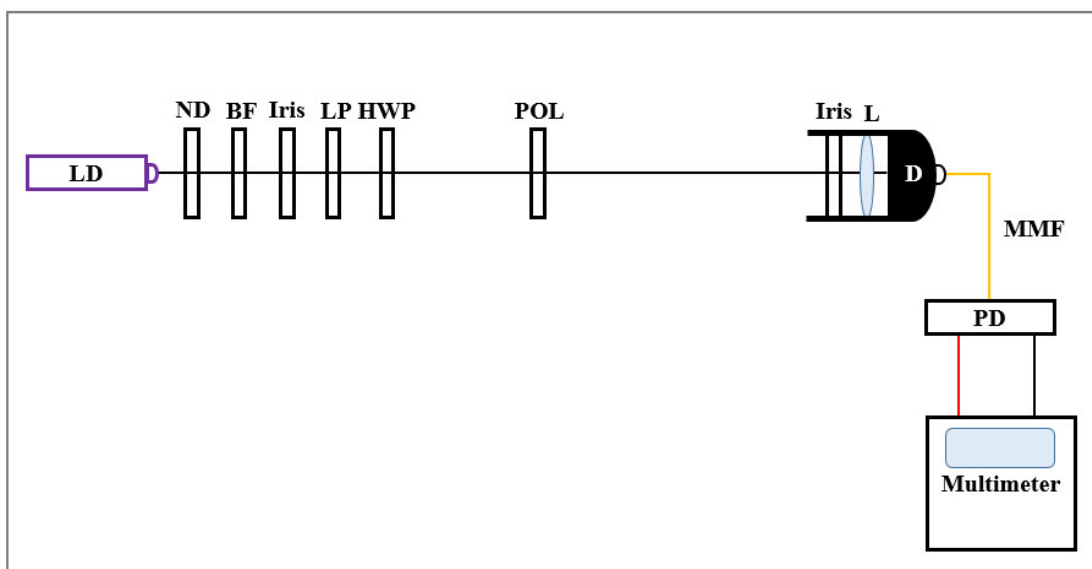
สำหรับสัญลักษณ์และคำย่อทั้งหมดที่ปรากฏในแผนภาพจะอธิบายไว้ในหัวข้อ “คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ”

จากแผนภาพที่ 7 เลเซอร์ไดโอด (LD) จะถูกปั๊มที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ คือ 560 mV, 760 mV และ 960 mV โดยเลือกค่าความต่างศักย์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่ (Function generator) และสังเกตผลการปรับ Peak-to-Peak จากหน้าจอของออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่ต่อไว้ดังแผนภาพด้านบน

ในการวัดค่าสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอดที่ความต่างศักย์ต่างกัน 3 ระดับนั้น เราจะใช้ตัวลดทอนความเข้มแสง (ND) ที่มี Optical Density ประมาณ 2.5 มาลดทอนความเข้มของปั๊มลง และใช้ตัวกรองสีน้ำเงิน (BF) ชนิดผ่านแถบความถี่ กรองแสงในย่านสีน้ำเงินที่อาจปนเข้ามา กับแสงเลเซอร์ของเราออกไป และใช้แผ่นกั้นแสงชนิดรูเปิด (Iris) มาบังแสงส่วนที่กระเจิงออกมาจากปั๊ม และบีบให้แสงผ่านช่องเล็กๆ โดยจะเปิดแผ่นกั้นดังกล่าวไว้ประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นให้แสงผ่านเข้าไปยังตัวตรวจวัด (D) และผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (MMF) ที่มีความยาวประมาณ 1 เมตร เข้าไปยังชุดตรวจวัดสเปกตรัม รุ่น HR4000CG-UV-NIR ซึ่งสามารถวัดสเปกตรัมได้ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 200 – 1000 นาโนเมตร จากนั้น เราจะบันทึกค่าสเปกตรัมของปั๊มที่ความต่างศักย์ต่างกัน 3 ระดับ จากหน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านซอฟต์แวร์ที่มาพร้อมกับชุดตรวจวัดสเปกตรัม และนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟ เพื่อหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่ความต่างศักย์ต่างกัน 3 ระดับต่อไป

4. การสร้างสถานะโพลาไรเซชันของปั๊ม

ในการสร้างสถานะโพลาไรเซชันของปั๊มจะจัดวางอุปกรณ์ทางแสง ดังแผนภาพด้านล่างนี้



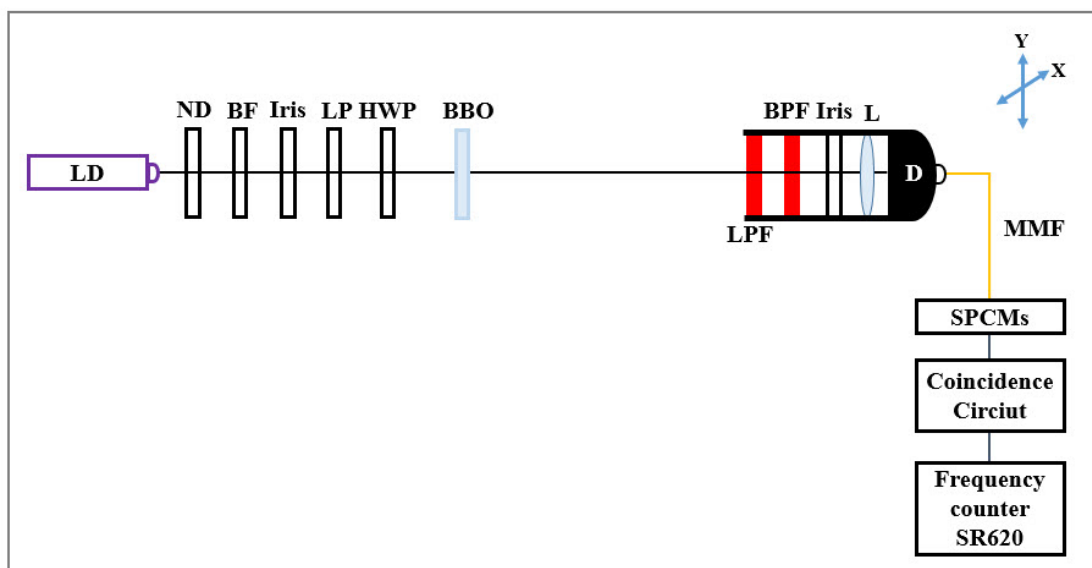
ภาพที่ 8 แสดงแผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับสร้างโพลาไรเซชันของปริม

จากแผนภาพที่ 8 หลังจากทีแสงผ่านแผ่นกั้นแสงชนิดรูเปิด (Iris) ออกมา แสงจะถูกทำให้เป็นโพลาไรซ์ (polarized light) โดยโพลาไรเซอร์เชิงเส้น (LP) ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 550 – 1500 นาโนเมตร และใช้แผ่นครึ่งคลื่น (HWP) ที่มีความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร เป็นตัวทำให้แสงอยู่ในแนวที่ต้องการ จากนั้น แสงจะผ่านตัววิเคราะห์โพลาไรเซอร์ (POL) และผ่านเข้าไปยังตัวตรวจจับ (D) ที่ต่ออยู่กับโฟโตไดโอด (PD) ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (MMF) โดย PD จะทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มแสงให้เป็นความต่างศักย์ และแสดงผลค่าความต่างศักย์ที่มัลติมิเตอร์ดังแผนภาพ

ในการวิเคราะห์โพลาไรเซชันของปริมที่ออกมา เราจะหมุนตัววิเคราะห์โพลาไรเซอร์ (POL) ไปทีละ 15 องศา และบันทึกค่าความต่างศักย์ที่แต่ละตำแหน่งที่หมุน POL ไป และนำผลที่บันทึกได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่หมุน POL ไป และความต่างศักย์ที่บันทึกได้จากมัลติมิเตอร์ จากนั้น นำค่าสูงสุด-ต่ำสุดที่บันทึกได้ ไปวิเคราะห์สภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชัน และวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันตามสมการที่ (34) และ (35) ตามลำดับ

5. การสแกนรอบจุดที่คู่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน

ในการศึกษาลักษณะของจุดที่คู่โฟตอนมาซ้อนทับกันนั้นจะจัดวางอุปกรณ์ทางแสงดังแผนภาพด้านล่างนี้



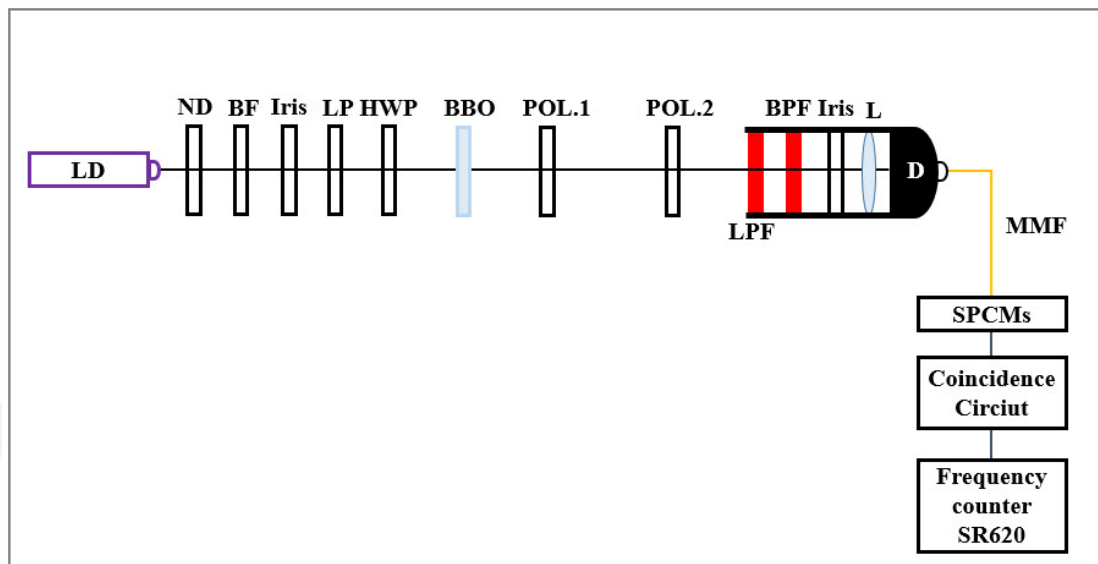
ภาพที่ 9 แสดงแผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับสแกนรอบบริเวณจุดที่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน

จากแผนภาพที่ 9 แสงที่ถูกทำให้เป็นโพลาไรซ์ในหัวข้อที่ 5 จะผ่านเข้าสู่ผู้ผลิตหักเหสองแนวชนิดเบต้าแบเรียมบอเรต (BBO) ที่มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร และผ่านเข้าไปยังตัวตรวจวัด (D) ซึ่งมีตัวกรองแสงชนิดผ่านความยาวคลื่นมาก (LPF) ที่ยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 780 นาโนเมตร ผ่านได้ กับตัวกรองแสงชนิดผ่านแถบความถี่ (BPF) ที่ยอมให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 810 ± 2 นาโนเมตร ผ่านได้ บังอยู่ด้านหน้า โดยทั้ง LPF และ BPF จะถูกวางซ้อนกันบริเวณด้านหน้า D ดังแผนภาพ ซึ่งตัวตรวจวัด (D) จะสามารถหมุนปรับได้ 2 แกน คือ X: ซ้าย-ขวา และ Y: ขึ้น-ลง

ในการวิเคราะห์ลักษณะของจุดที่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกันนั้น เราจะสแกนตัวตรวจวัด (D) ไปทีละ 1 มิลลิเมตร แล้วบันทึกค่าแต่ละตำแหน่ง และนำผลที่ได้มาเขียนกราฟแบบคอนทัวร์ (contour) โดยจะสแกนเป็นพื้นที่ที่ประมาณ 10×10 ตารางมิลลิเมตร และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ตำแหน่งความเข้มสูงสุด และตำแหน่งที่ควรวางตัวตรวจวัดเพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

6. การวิเคราะห์โพลาไรเซชันของจุดที่คู่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน

ในการวิเคราะห์โพลาไรเซชันของจุดที่คู่โฟตอนมาซ้อนทับกันนั้นจะจัดวางอุปกรณ์ทางแสง ดังแผนภาพด้านล่างนี้

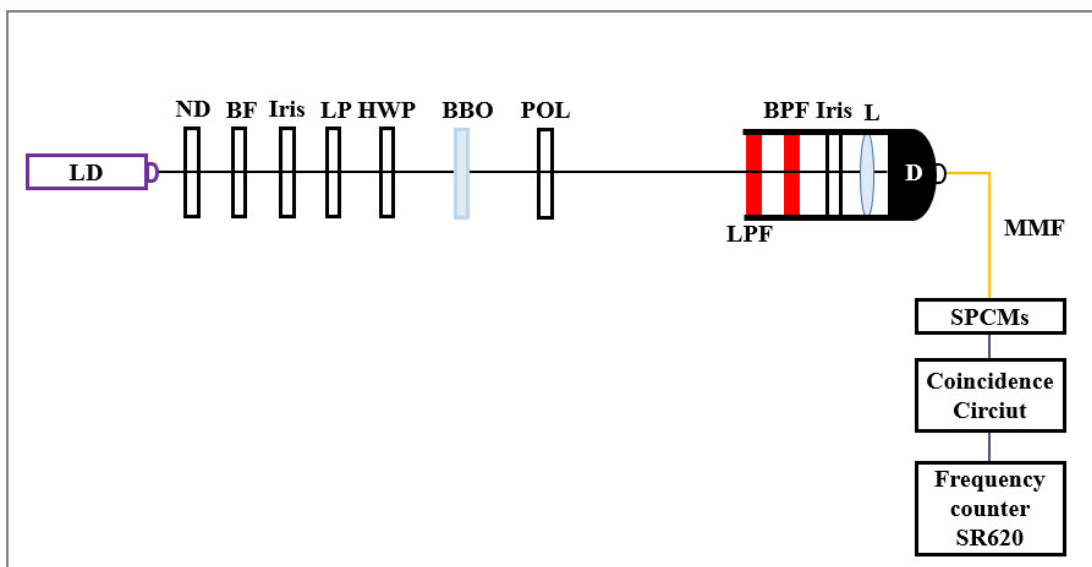


ภาพที่ 10 แสดงแผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับวิเคราะห์โพลาไรเซชันของจุดที่คู่โฟตอนมาซ้อนทับกัน

ภาพที่ 10 แสดงการจัดอุปกรณ์ทางแสงเพื่อวิเคราะห์โพลาไรเซชันบริเวณจุดที่คู่โฟตอนมาซ้อนทับกัน โดยการวางโพลาไรเซอร์ (POL.1) ไว้ที่มุมต่างๆ กัน คือ 0, 45, 90 และ 135 องศา และหมุนตัววิเคราะห์โพลาไรซ์ (POL.2) ไปทีละ 15 องศา นำผลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างมุมที่หมุน POL.2 ไปเทียบกับมุมที่ฟิกซ์ (fixed) POL.1 ไว้ โดยทำซ้ำที่ความต่างศักย์ต่างกัน 3 ระดับ และในการเก็บข้อมูลจะบันทึกจำนวนโฟตอนที่ผ่านเข้ามายังหน้าตัวตรวจวัด (D) ในเวลา 10 วินาที เท่านั้น จากนั้น นำจำนวนโฟตอนสูงสุด - ต่ำสุดที่ได้ ไปวิเคราะห์สภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันในสมการที่ (34) และวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันดังสมการที่ (35) ต่อไป

7. การวิเคราะห์ความเป็นโฟตอนเดี่ยวของจุดที่คู่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน

ในการวิเคราะห์ความเป็นโฟตอนเดี่ยวของจุดที่คู่โฟตอนมาซ้อนทับกันนั้นจะจัดวางอุปกรณ์ทางแสง ดังแผนภาพด้านล่างนี้

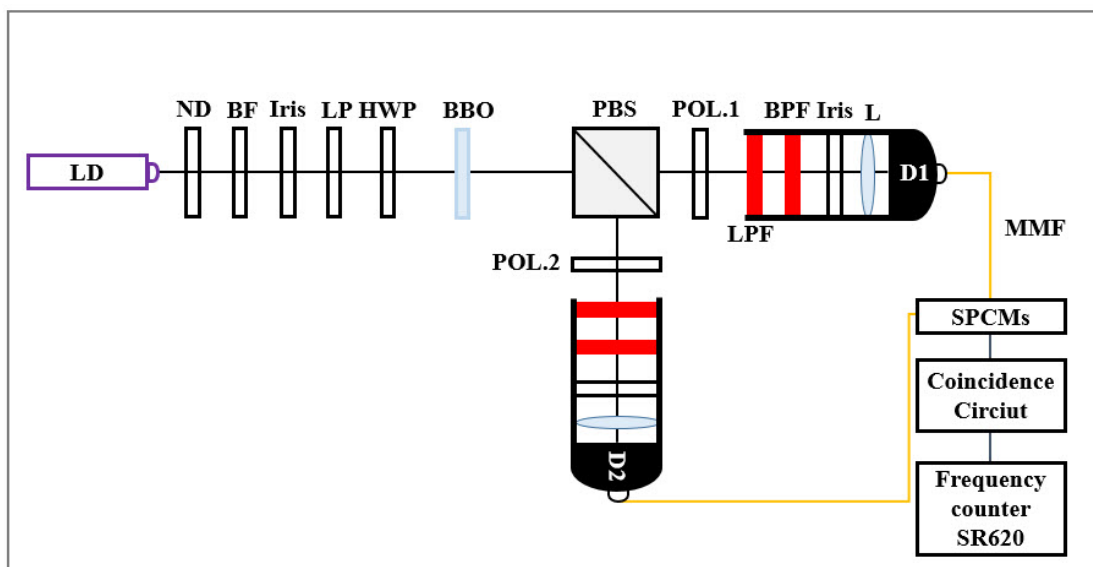


ภาพที่ 11 แสดงแผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับวิเคราะห์ความเป็นโฟตอนเดี่ยวของจุดที่คู่โฟตอนมาซ้อนทับกัน

ภาพที่ 11 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับวิเคราะห์ความเป็นโฟตอนเดี่ยวบริเวณจุดที่คู่โฟตอนมาซ้อนทับกัน โดยในการศึกษาเราจะหมุนตัววิเคราะห์โพลาไรเซชัน (POL) ที่อยู่หน้า BBO ไปทีละ 15 องศา และบันทึกจำนวนโฟตอนที่ผ่านเข้าสู่ตัวตรวจจับ (D) ในเวลา 10 วินาที จากนั้น นำผลที่ได้ไปมาเขียนกราฟระหว่างมุมที่หมุน POL ไปกับจำนวนโฟตอนที่นับได้ในเวลา 10 วินาที และนำจำนวนโฟตอนสูงสุด-ต่ำสุด มาวิเคราะห์สภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันในสมการที่ (34) และวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันดังสมการที่ (35)

8. การวัดสหสัมพันธ์ทางโพลาไรเซชันของคู่โฟตอน

ในการศึกษาสหสัมพันธ์ทางโพลาไรเซชันของคู่โฟตอนนั้นจะจัดวางอุปกรณ์ทางแสง ดังแผนภาพด้านล่างนี้

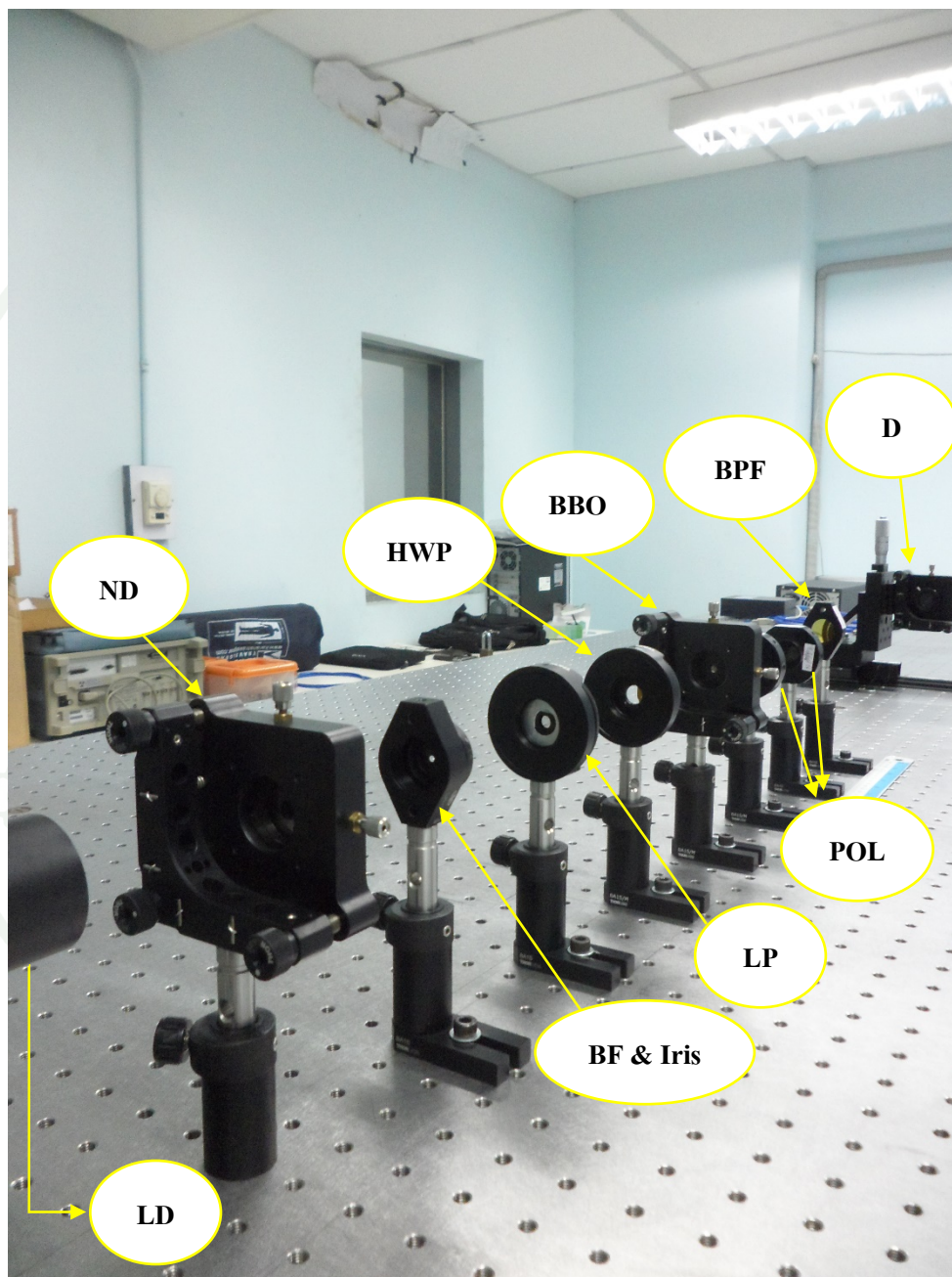


ภาพที่ 12 แสดงแผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ทางแสงสำหรับศึกษาสหสัมพันธ์ทางโพลาไรเซชันของคู่โฟตอน

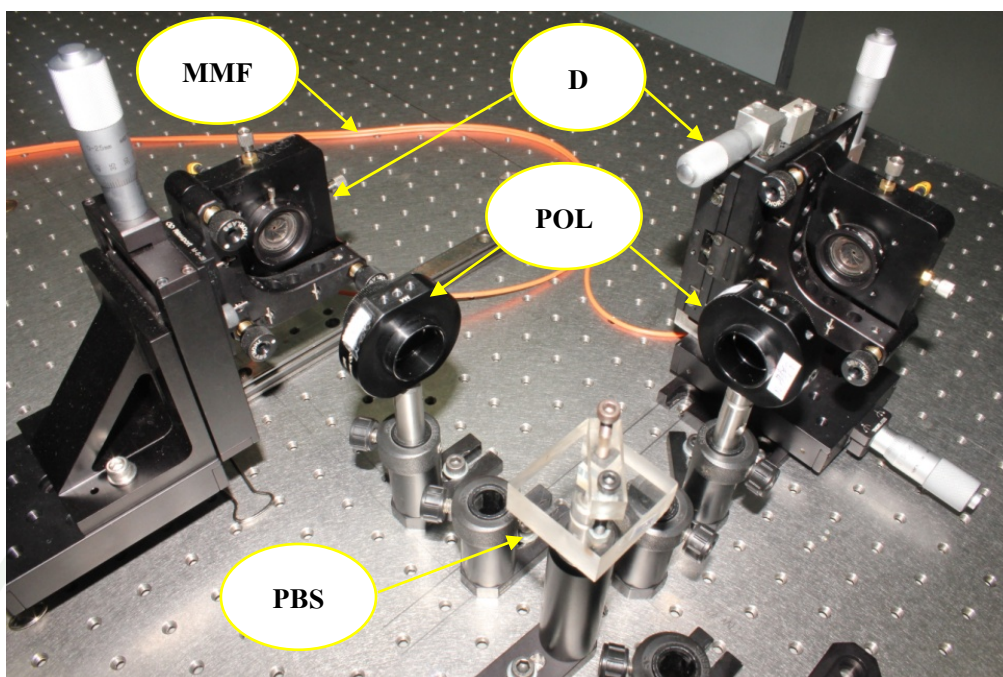
ภาพที่ 12 แสดงการจัดอุปกรณ์ทางแสงสำหรับศึกษาสหสัมพันธ์ทางโพลาไรเซชันของคู่โฟตอน หรือเป็นการแสดงความสัมพันธ์ให้เห็นว่ามีโฟตอนเกิดขึ้นเป็นคู่ โดยการให้โฟตอนที่ออกจาก BBO ผ่านเข้ามายังตัวแยกแสงโพลาไรซ์ (PBS) ซึ่งทำหน้าที่แยกแสงที่มีโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน ออกไปเป็นสองแนว หากมีโฟตอนที่มีโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน โฟตอนจะวิ่งผ่านเข้าสู่หน้า D1 และ D2 อย่างละตัว จากนั้น หากหมุนโพลาไรเซอร์ตัวใดตัวหนึ่งที่อยู่นำตัวตรวจวัด (D) ไปโดยฟิกซ์ (fixed) อีกตัวไว้ จะพบว่าเกิดโพลาไรซ์ให้เห็น เนื่องจากโฟตอนทั้งสองตั้งฉากกัน หากโพลาไรซ์ตรงกันจะได้ค่าจำนวนโฟตอนเยอะสุด แต่หากโพลาไรซ์ตั้งฉากกันก็จะได้จำนวนโฟตอนน้อยสุด แต่หลักการนี้ ก็ขึ้นอยู่กับเวลาที่โฟตอนทั้งสองจะวิ่งมาเจอกัน โดยวงจรที่ใช้จะให้โฟตอนมาทันกันในเวลา 4 นาโนวินาที จากนั้น นำผลที่ได้มาวิเคราะห์สภาพมองเห็นได้ และค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ตามสมการที่ (34) และ (35) เช่นเดียวกัน

ผลและวิจารณ์

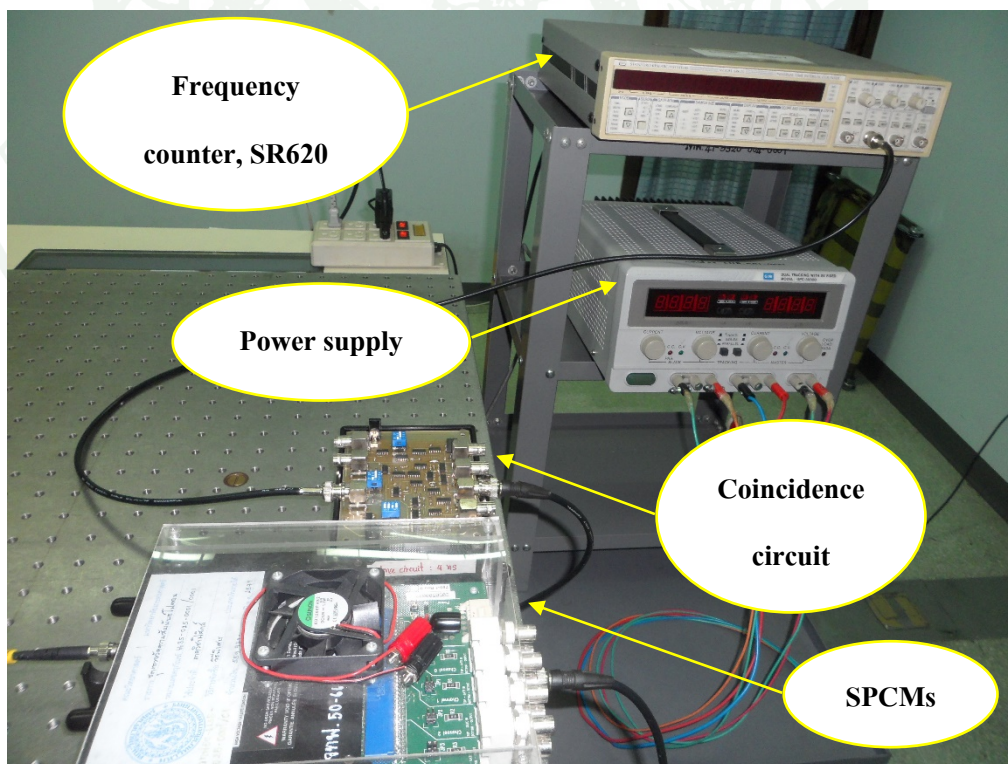
1. ผลการจัดอุปกรณ์ทางแสง



ภาพที่ 13 แสดงการจัดอุปกรณ์ทางแสงสำหรับศึกษาโพลาไรเซชันของคู่โฟตอน

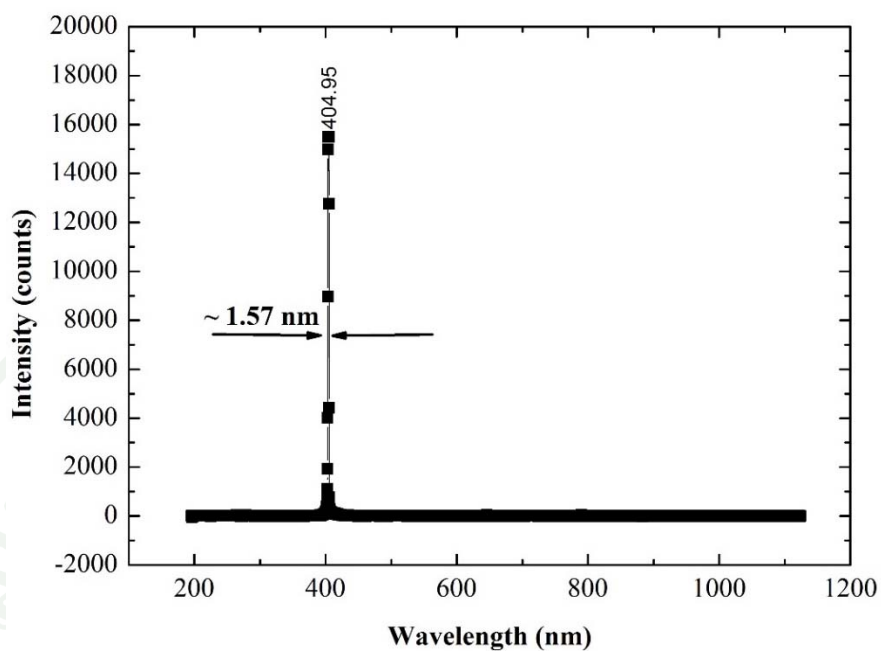


ภาพที่ 14 แสดงการจัดอุปกรณ์ทางแสงสำหรับศึกษาสัมพัทธ์ทางโพลาไรเซชันของคู่โฟตอน

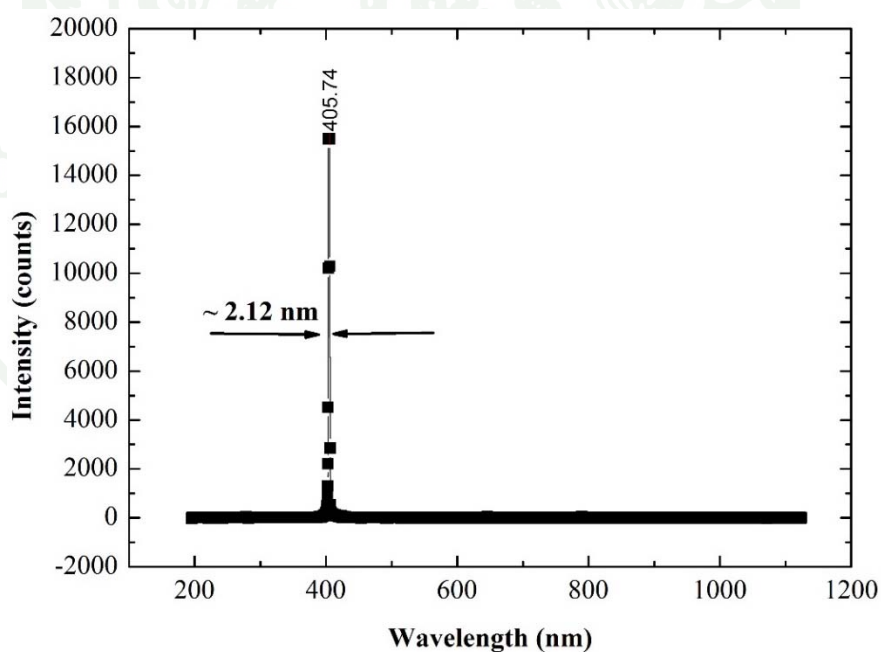


ภาพที่ 15 แสดงการจัดอุปกรณ์ทางแสงสำหรับวัดคู่โฟตอน

2. ผลการวัดสเปกตรัมของปมที่มีความต่างศักย์ 3 ระดับ คือ 560 mV, 760 mV และ 960 mV

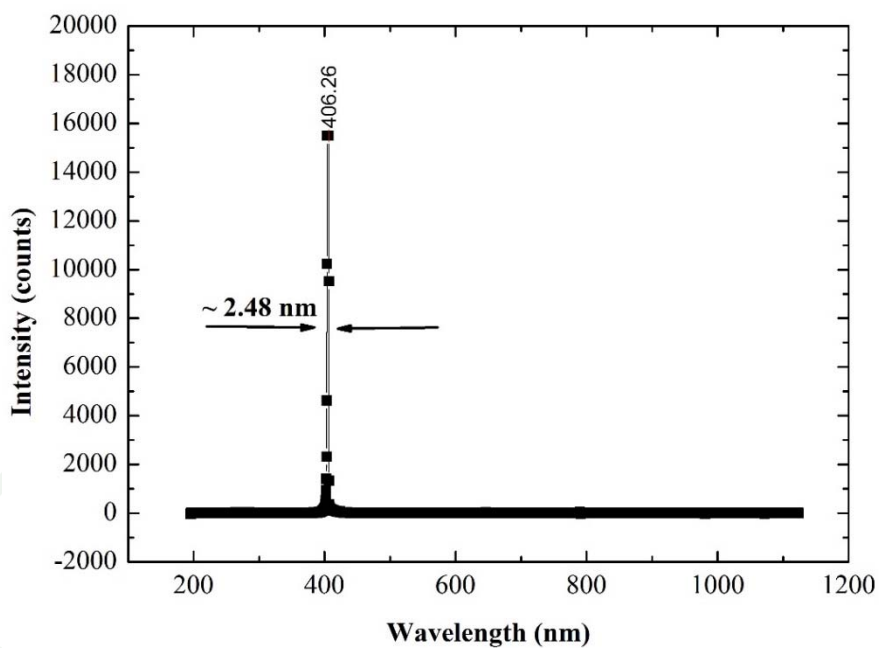


(ก)



(ข)

ภาพที่ 16 แสดงผลการวัดสเปกตรัมของปมที่ (ก) 560 mV (ข) 760 mV และ (ค) 960 mV

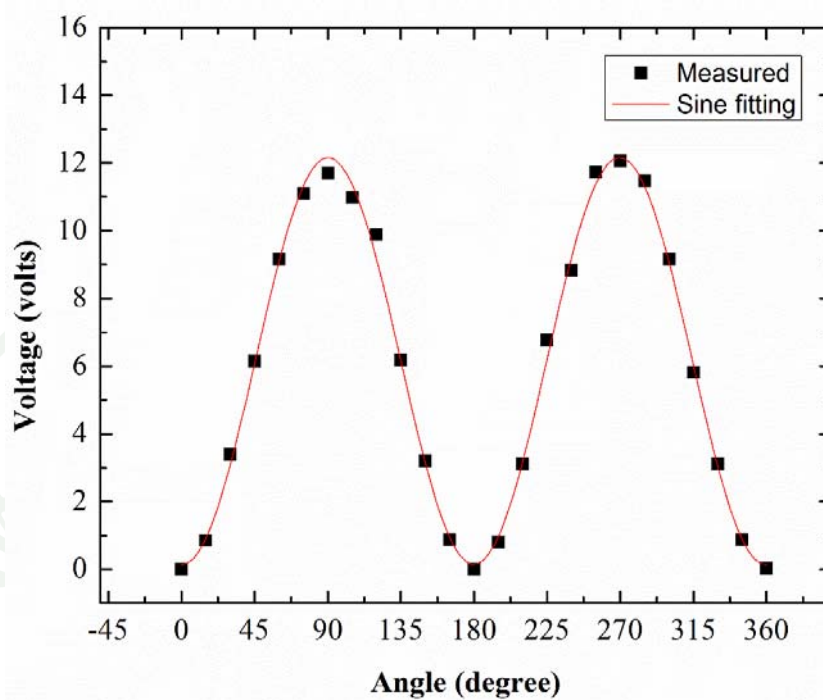


(ค)

ภาพที่ 16 (ต่อ)

จากกราฟในภาพที่ 16 (ก) – (ค) พบว่าความยาวคลื่นและความกว้างของพีคที่ตำแหน่งตรงกลาง (Full Width at Half Maximum: FWHM) ของพีคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์ของพีมเพิ่มขึ้น โดยสามารถวัดความยาวคลื่นที่ความต่างศักย์ 560 mV, 760 mV และ 960 mV ได้เป็น 404.95 nm, 405.74 nm และ 406.26 nm ตามลำดับ และวัด FWHM ได้เป็น 1.57 nm, 2.12 nm และ 2.48 nm ตามลำดับ

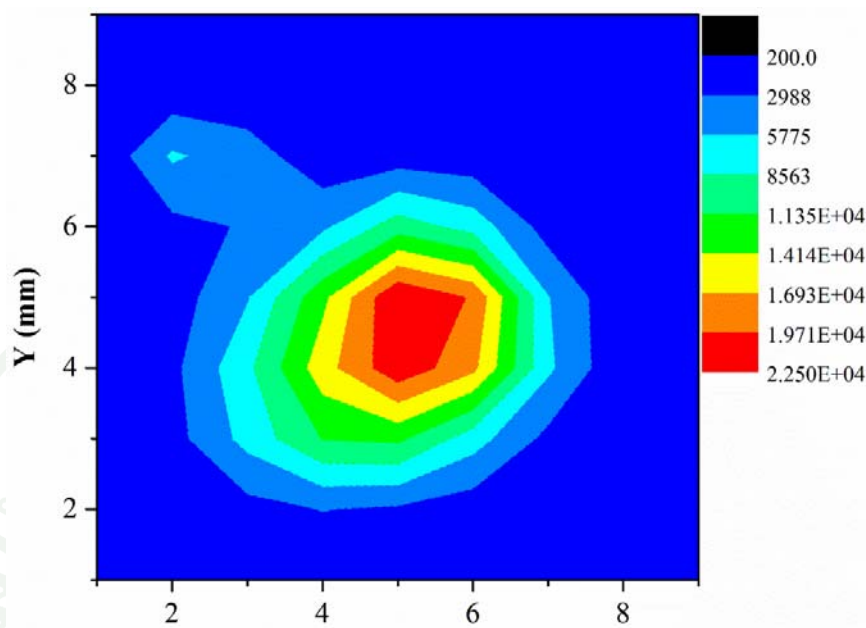
3. ผลการสร้างสถานะโพลาริเซชันของปั๊ม



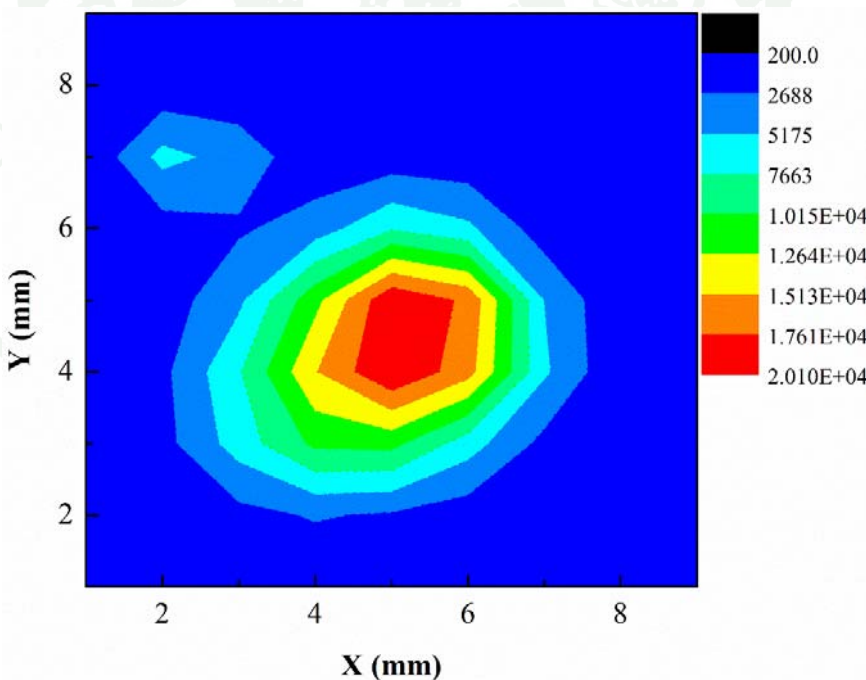
ภาพที่ 17 แสดงโพลาริเซชันของปั๊ม

ภาพที่ 17 แสดงโพลาริเซชันของปั๊ม จากกราฟพบว่า เมื่อนำค่าความต่างศักย์สูงสุด-ต่ำสุด มาคำนวณค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาริเซชันในสมการ (34) พบว่า มีค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาริเซชันอยู่ประมาณ 0.99 นั่นคือ โพลาริเซชันของปั๊มมีโพลาริเซชันอยู่ในแนวอนอย่างชัดเจน

4. ผลการสแกนรอบจุดที่คู่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน

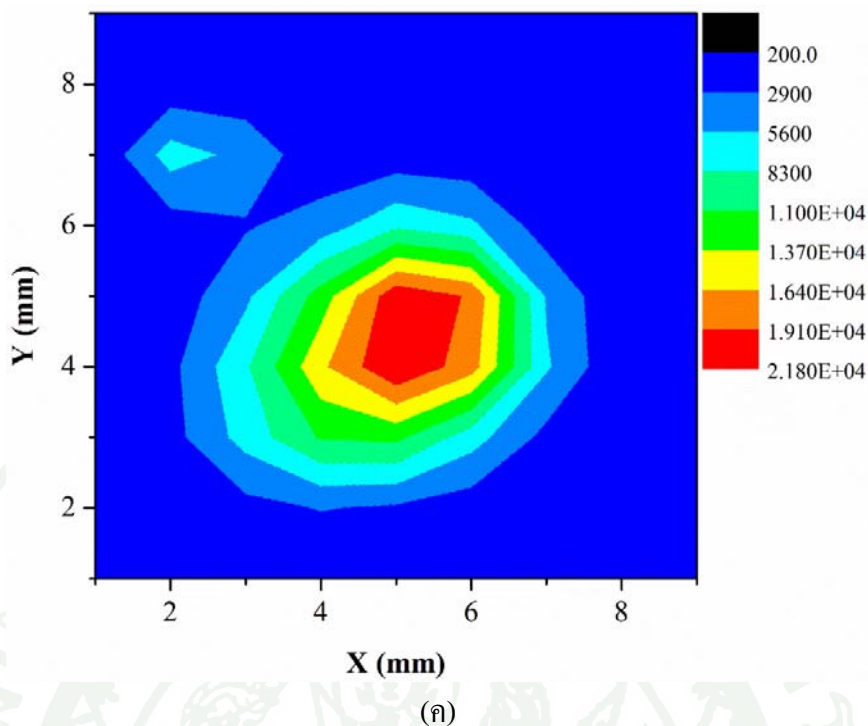


(ก)



(ข)

ภาพที่ 18 แสดงผลการสแกนบริเวณจุดที่โฟตอนมีการซ้อนทับกันที่ (ก) 560 mV (ข) 760 mV และ (ค) 960 mV

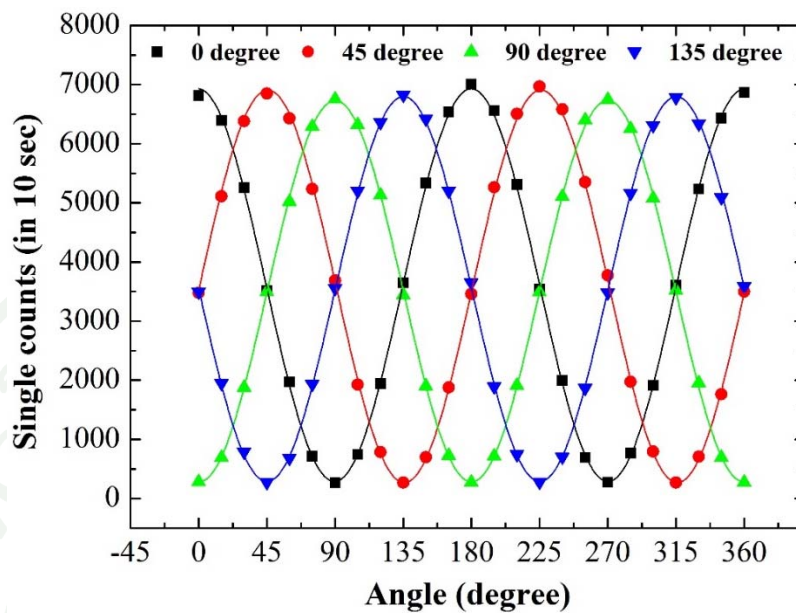


ภาพที่ 18 (ต่อ)

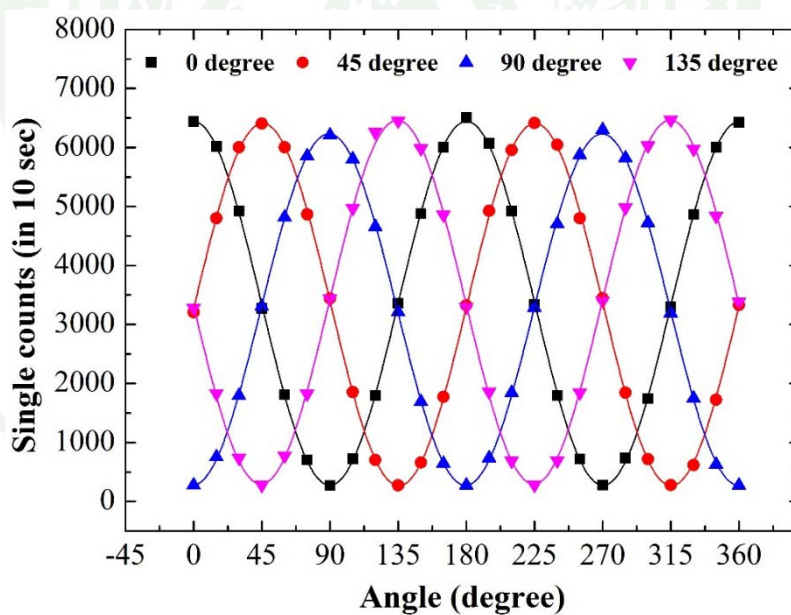
ภาพที่ 18 เป็นผลการสแกนตัวตรวจวัด (D) รอบบริเวณจุดที่คู่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน ซึ่งจากแผนภาพพบว่า บริเวณตำแหน่งตรงกลาง (สีแดง) เป็นบริเวณที่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกันมากที่สุด โดยพบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 1 มิลลิเมตร ขณะที่บริเวณรอบๆ ขอบที่ไม่เป็นวงกลม (สีฟ้าอ่อนกับสีฟ้า) เป็นบริเวณที่เกิดการกระเจิงของโฟตอน เมื่อความต่างศักย์ของปั๊มมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตำแหน่งตรงกลางที่เราสนใจ

แผนภาพที่ได้ทำให้เราสามารถทราบตำแหน่งที่แน่นอนที่ควรวางตัวตรวจวัดไว้ เพื่อใช้ในการศึกษาในขั้นตอนต่อไปได้ อีกทั้ง แผนภาพดังกล่าวยังช่วยยืนยันว่าการซ้อนทับกันของคู่โฟตอนเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งกลาง เนื่องจากจุดที่เราสแกนอยู่บริเวณตรงกลางและอยู่แนวเดียวกับแนวแสงของปั๊มพอดี

5. ผลการวิเคราะห์โพลาไรเซชันของจุดที่คู่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน



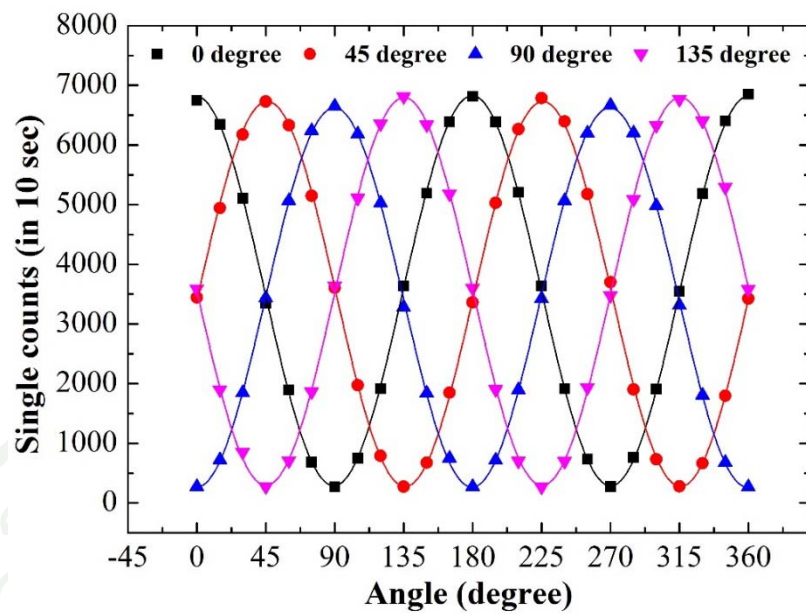
(ก)



(ข)

ภาพที่ 19 แสดงผลการวิเคราะห์โพลาไรเซชันบริเวณจุดที่คู่โฟตอนมีการซ้อนทับกันที่ (ก) 560 mV

(ข) 760 mV และ (ค) 960 mV



(ค)

ภาพที่ 19 (ต่อ)

ภาพที่ 19 แสดงผลการศึกษาโพลาริเซชันบริเวณจุดที่คู่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน จากกราฟทั้ง 3 พบว่า จำนวนโฟตอนสูงสุด – ต่ำสุด ที่มุมต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อนำค่าดังกล่าวไปคำนวณค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาริเซชัน และค่าความแน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาริเซชันด้วยสมการ (34) และ (35) พบว่าได้ผลดังตารางที่ 3 และ 4 ดังนี้

ตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาริเซชันที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ

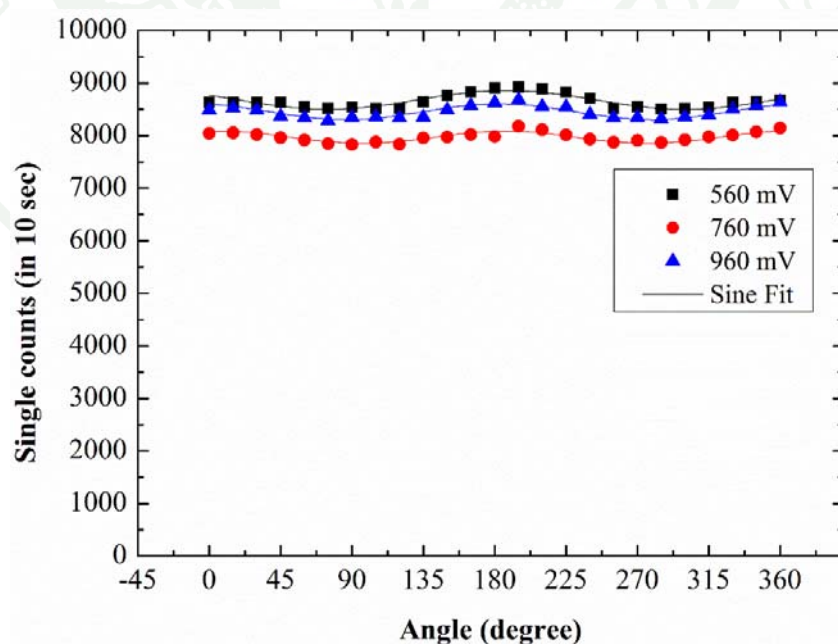
ค่าความต่าง ศักย์ (mV)	ค่าสภาพมองเห็นได้ (V) ที่มุม			
	0°	45°	90°	135°
560	0.93	0.93	0.92	0.92
760	0.92	0.92	0.92	0.92
960	0.92	0.92	0.92	0.92

ตารางที่ 4 แสดงผลการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ

ค่าความต่างศักย์ (mV)	ค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ (σ_v) ที่มุม			
	0°	45°	90°	135°
560	0.004	0.004	0.005	0.005
760	0.005	0.005	0.005	0.005
960	0.005	0.005	0.005	0.005

จากตารางที่ 3 และ 4 พบว่า ค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันและค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ที่ความต่างศักย์ต่างกัน 3 ระดับ มีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือ เฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 0.92 และ 0.005 ตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวที่ได้ เป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นว่าโพลาไรเซชันของโฟตอนบริเวณที่มีการซ้อนทับกันนั้น มีลักษณะไม่มีความเป็นโพลาไรซ์ (unpolarized light) เนื่องจากค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันที่มุมต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือ เราไม่สามารถระบุโพลาไรซ์ที่แน่นอนบริเวณจุดดังกล่าวได้ นั่นเอง

6. ผลการวิเคราะห์ความเป็นโพตอนเดี่ยวของจุดที่คู่โฟตอนเกิดการซ้อนทับกัน



ภาพที่ 20 เปรียบเทียบความเป็นโพตอนเดี่ยวที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ คือ 560 mV, 760 mV และ 960 mV

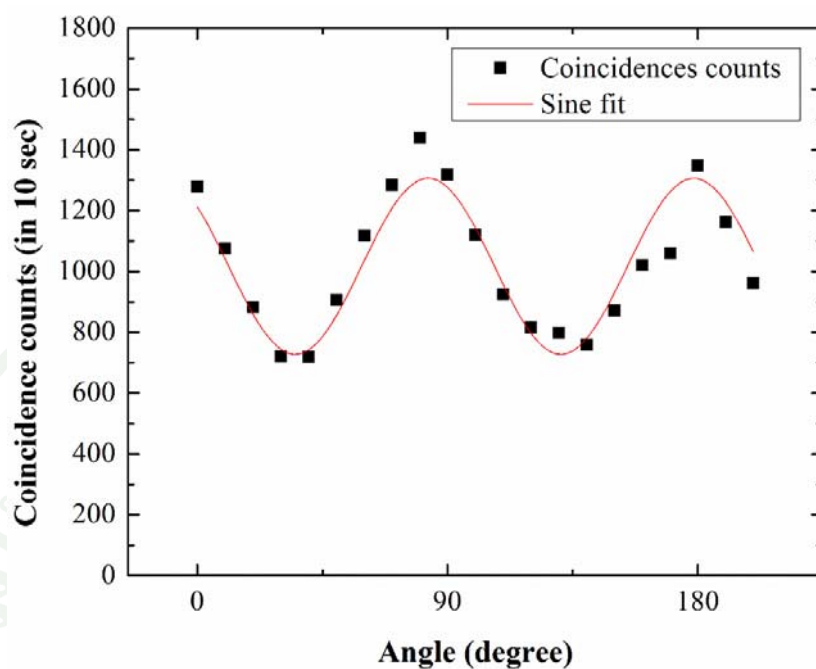
ภาพที่ 20 แสดงผลการเปรียบเทียบความเป็นโพตอนเดี่ยวบริเวณจุดที่คู่โพตอนเกิดการซ้อนทับกัน จากกราฟพบว่าที่ความต่างศักย์ 560 mV จะมีความเป็นโพตอนเดี่ยว หรือให้จำนวนโพตอนมากที่สุด อีกทั้งเมื่อพิจารณาที่เส้นกราฟทั้ง 3 เส้น จะพบว่าค่าสูงสุด-ต่ำสุดของแต่ละเส้นมีค่าต่างกันน้อยมาก แต่กราฟยังคงมีลักษณะของกราฟไซน์ให้เห็นอยู่ และเมื่อนำผลที่ได้ไปคำนวณค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาริเซชัน และค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาริเซชันจากสมการ (34) และ (35) พบว่าได้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงผลการคำนวณค่าสภาพมองเห็นได้และค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาริเซชันของโพตอนเดี่ยวที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ

ค่าความต่างศักย์ (mV)	560	760	960
ค่าสภาพมองเห็นได้	0.02	0.02	0.02
ค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้	0.01	0.01	0.01

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาริเซชันของโพตอนเดี่ยวที่ความต่างศักย์ 3 ระดับ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.02 โดยมีค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.01 ซึ่งค่าดังกล่าวที่ได้บ่งบอกว่า เราไม่สามารถวิเคราะห์ความเป็นโพลาไรซ์ของโพตอนเดี่ยว ณ บริเวณที่โพตอนเกิดการซ้อนทับกันได้ เนื่องจากค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาริเซชันมีค่าน้อยมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า หากเราวิเคราะห์โพลาริเซชันบริเวณที่คู่โพตอนมีการซ้อนทับกันอยู่นั้น เราจะพบว่า ณ บริเวณนั้น โพตอนจะไม่มีโพลาไรซ์ให้เห็น นั่นเอง

7. ผลการวัดสหสัมพันธ์ทางโพลาไรเซชันของคู่โฟตอน



ภาพที่ 21 แสดงผลการศึกษาโพลาไรเซชันของคู่โฟตอนที่มาพร้อมกันในเวลา 4 นาโนวินาที

ภาพที่ 21 แสดงผลการศึกษาสหสัมพันธ์ทางโพลาไรเซชันของคู่โฟตอนที่มาพร้อมกันในเวลา 4 นาโนวินาที เมื่อพิจารณาค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันจากกราฟ พบว่า คู่โฟตอนที่ส่งผ่านและสะท้อนจาก PBS มีสหสัมพันธ์กันทางโพลาไรเซชันค่อนข้างน้อย คือ ประมาณ 0.33 แต่ค่าดังกล่าวก็สามารถใช้บ่งบอกได้ว่ามีโฟตอนเกิดขึ้นเป็นคู่ แต่ยังไม่สามารถนำไปใช้งานหรือศึกษาได้ในทางกลศาสตร์ควอนตัม โดยค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันที่เหมาะสมจะนำไปศึกษาต่อในทางกลศาสตร์จะอยู่ที่ประมาณ 0.75 - 1

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

กระบวนการแปลงผันลงอิงพารามิเตอร์แบบเกิดเอง (Spontaneous parametric down-conversion process: SPDC) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการผลิตโฟตอน ถึงแม้ว่ากระบวนการดังกล่าวจะสามารถเข้าใจได้ในแง่ของกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) ก็ตาม แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวก็เทียบได้กับพลศาสตร์ไฟฟ้าแบบเก่า (classical electrodynamics) โดยในกระบวนการเกิดแสงที่ความถี่เป็น 2ω จากแสงเข้าที่ความถี่ ω เมื่ออยู่ภายใต้การอนุรักษ์พลังงาน โฟตอนสองโฟตอนที่ตกกระทบจะคู่กันและเกิดเป็นโฟตอนที่มีความถี่เพิ่มขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการแปลงผันขึ้น (up-conversion) ในการเกิด SPDC จะพิจารณาให้เข้าใจง่ายว่าเป็นกระบวนการผันกลับของการแปลงผันขึ้น

ในการศึกษาผลของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อคู่โฟตอนที่สร้างขึ้น พบว่าความยาวคลื่นและความกว้างของพีก (Full Width at Half Maximum: FWHM) ของปั๊มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความต่างศักย์ของปั๊มเพิ่มขึ้น โดยสามารถวัดความยาวคลื่นที่ความต่างศักย์ 560 mV, 760 mV และ 960 mV ได้เป็น 404.95 nm, 405.74 nm และ 406.26 nm ตามลำดับ และวัด FWHM ได้เป็น 1.57 nm, 2.12 nm และ 2.48 nm ตามลำดับ พบว่าที่ความต่างศักย์ 560 mV จะให้จำนวนโฟตอนเดี่ยวมากที่สุดเมื่อเทียบกับความต่างศักย์ที่เหลือ เนื่องจากค่าความยาวคลื่นที่ 560 mV ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณที่สุด คือ 405 นาโนเมตร โดยลักษณะของจุดที่โฟตอนมีการซ้อนทับกันจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณ 1 มิลลิเมตร และมีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 810 ± 2 นาโนเมตร จากตำแหน่งตรงกลางของจุดโดยเทียบกับสเปกของอุปกรณ์ที่ยอมให้แสงผ่านได้ อีกทั้งเมื่อวิเคราะห์โพลาไรเซชันของจุดดังกล่าวจะพบว่ามีลักษณะไม่มีโพลาไรเซชันให้เห็น (unpolarized light) เนื่องจากที่มุมต่างๆ ที่วิเคราะห์ คือ 0° , 45° , 90° และ 135° จำนวนโฟตอนที่ตำแหน่งสูงสุดใกล้เคียงกัน นั่นคือ ประมาณ 6700 ตัว และมีสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันโดยเฉลี่ยประมาณ 0.92 และค่าความไม่แน่นอนของสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันโดยเฉลี่ยประมาณ 0.01

ในการนำคู่โฟตอนที่ได้ไปใช้ในการศึกษาขั้นสูงนั้น ผู้วิจัยได้หยิบยกงานวิจัยในปัญหาพิเศษที่ทำร่วมกับนายพนฤทธิ์ สกุนะสิงห์ มาเป็นตัวอย่างแสดง นั่นคือ การศึกษาสหสัมพันธ์ทางโพลาไรเซชันของโฟตอนที่สร้างขึ้นจากกระบวนการ SPDC ซึ่งเป็นการศึกษาคู่โฟตอนที่เกิดพร้อมกันในเวลา 4 นาโนวินาที และเป็นการพิสูจน์ว่าโฟตอนเกิดขึ้นและออกมาจากผลึกไม่เชิงเส้นเป็นคู่ๆ

โดยในการศึกษาได้วัดสหสัมพันธ์ทางโพลาไรเซชัน พบว่าค่าสภาพมองเห็นได้ทางโพลาไรเซชันมีค่าประมาณ 0.33 ซึ่งถือว่าน้อย แต่ทำให้ทราบได้ว่ามีคู่โฟตอนเกิดขึ้นจริง

ข้อเสนอแนะ

1. เลเซอร์ไดโอดที่ใช้ในการทำวิจัย ให้แสงที่มีโพลาไรซ์แบบวงรี ดังนั้น ควรทำแสงให้เป็นโพลาไรซ์ที่แน่นอนก่อน และควรเช็คความยาวคลื่นของเลเซอร์ทุกครั้งที่ใช้งาน ทั้งนี้ เพื่อให้ได้จำนวนโฟตอนและค่าเหมาะสมกับการนำไปงานจริงๆ
2. ผลึก BBO ที่นำมาใช้ในการศึกษามีขนาด $5 \times 5 \times 1$ มิลลิเมตร เมื่อนำไปใช้งานระดับที่สูงขึ้นไป หากไม่มีแผ่นควอตซ์ที่เพียงพอในการชดเชยจะทำให้ได้สหสัมพันธ์ทางโพลาไรเซชันไม่ดีพอ ดังนั้น ควรลดขนาดความหนาของผลึกลงไป
3. งานวิจัยสามารถนำไปศึกษาเพิ่มเติมได้อีก เนื่องจากมีหลายๆ แ่งที่ยังไม่ได้ศึกษาเนื่องจากมีอุปกรณ์ไม่เพียงพอ เช่น การวัดสเปกตรัมของจุดที่เกิดการซ้อนทับกัน หรือการวัดสเปกตรัมร่วมกัน (joint spectrum) ของรังสีพิเศษ (e-ray) และรังสีธรรมดา (o-ray) เป็นต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Anstett, G., G. Göritz, D. Kabs, R. Urschel, R. Wallenstein and A. Borsutzky. 2001. Reduction of the spectral width and beam divergence of a BBO-OPO by using collinear type-II phase matching and back reflection of the pump beam. **Appl. Phys. B** 72 (5): 583-589.
- Daniel, E., 2009. Pump spectral bandwidth, birefringence and entanglement in type-II parametric down conversion. **Research Letters in Optics** 2009: 1-6.
- Kim, Y. H., and W. P. Grice. 2002. Generation and spectral engineering of pulsed polarization entangled states. **Proc. SPIE** 4821: 364-372.
- Lee, P. S. K., M. P. van Exter and J. P. Woerdman. 2005. How focused pumping affects type-II spontaneous parametric down-conversion. **Phys. Rev. A** 72 (3): 033803-033807.
- Poh, H. S., L. Chune Yang, I. Marcikic, A. Lamas-Linares and C. Kurtsiefer. 2007. Joint spectrum of polarization-entangled pairs from parametric down-conversion. **Phys. Rev. A** 75 (4): 043816-043823.
- Spasibko, K. Y., T. S. Iskhakov and M. V. Chekhova. 2012. Spectral properties of high-gain parametric down-conversion. **Opt. Express** 20 (7): 7507-7515.
- Timothy, E. K. and M. H. Rubin. 1997. Theory of two-photon entanglement for spontaneous parametric down-conversion driven by a narrow pump pulse. **Phys. Rev. A** 56 (2): 1534-1541.
- Yoonshik, K., L. Chang Hyouck, S. Yugene and N. Jaewoo. 2006. Effect of dispersion cancellation on the spectrum of photons generated from type-II parametric down conversion. **J. Korean Phys. Soc.** 50 (1): 21-27.



ภาคผนวก



SPCM-AQ4C

Single Photon Counting Module Array

Overview

The SPCM-AQ4C is a 4-channel photon counting card capable of detecting single photons of light over the wavelength range from 400 nm to 1060 nm. Each channel is independent from the others.

The SPCM-AQ4C uses a unique silicon avalanche photodiode (SliK™) that has a circular active area with a peak photon detection efficiency exceeding 60% at 650nm.

Each photodiode is both thermoelectrically cooled and temperature controlled, ensuring stabilized performance despite changes in the ambient temperature. The SPCM-AQ4C card uses an improved circuit with a peak count rate >4 M c/s for short bursts of time on all 4 channels and a count rate of 1.5 M c/s for continuous operation. There is a "dead time" of 50 nanoseconds (ns) between pulses.

The SPCM-AQ4C requires +2 Volt, +5 Volt, and +30 Volt power supplies. The output of each channel – a TTL pulse that is 4.5 Volts high (into a 50 Ω load) and 25 ns wide – is available at the card edge behind the circuit board. Each TTL pulse corresponds to a detected photon. All input and output signals are available at the card connector.



To avoid a degradation of the module linearity and stability, the heat sink temperature should be kept between 5°C and 40° C during operation.

Saturation

The count decreases at higher incoming light levels. The count at which the output rate starts to decrease is called the saturation point. As an extreme example, if the module is exposed to intense light, the count rate will fall to zero. Consequently, in certain applications, some tests should be performed by the operator to ensure that a low count rate is not caused by detector saturation. Precautions should be taken to avoid any excessive light level that will damage the SPCM.

Applications

- ▶ Single molecule detection
- ▶ High throughput DNA sequencing
- ▶ LIDAR
- ▶ Photon correlation spectroscopy
- ▶ Astronomical observation
- ▶ Optical range finding
- ▶ Adaptive optics
- ▶ Ultra sensitive fluorescence
- ▶ Particle sizing

Key Features and Benefits

- ▶ Peak photon detection efficiency at 650 nm: 60% typical
- ▶ Afterpulsing probability 0.5%
- ▶ Gated input
- ▶ TTL output
- ▶ FC fiber connector mounted and aligned on each detector
- ▶ 4 channels in one package
- ▶ Self-contained APD module with integrated electronics

SPCM-AQ4C

Fiber connection option

The SPCM-AQ4C has an "FC" fiber-optic receptacle pre-aligned to the optical detector. Optical fibers with an FC connector on one end are available separately (see Fiber Type Ordering Guide on page 7). The photon detection efficiency is typically 60% at 650nm.

Fiber shielding

When used with optical fibers, both the fiber and the connector shrouds must be completely opaque; if not, stray light will increase the count rate. The SPCM-QCX pigtailed conform to this requirement (see Fiber Type Ordering Guide on page 7).

Gating function

A gating function is provided with each channel. It is useful when looking for a signal that occurs only

in a small timeframe window. Also, in some applications the background light flux is higher than the signal. In this case, the gating option could be used to improve the S/N ratio by opening a window only when the light signal is present. The output of the module is enabled when a TTL low level is applied to the module gate input. Gated count rate is $\approx n-1$. The module is gated "OFF" when a TTL high level signal is applied to the gate input.

Light emission during photon detection

One peculiarity of silicon avalanche photodiodes is that as an incoming photon is detected, a small amount of light is emitted from the avalanche region. The light emitted has a broad spectral distribution. In most cases, this is not a problem. However, it can cause some confusion if another detector is monitoring light, or if the optical system is

such that light emitted from the SPCM-AQ4C is reflected back on itself. If these photons return more than 30 ns after the initial event, they will be detected.

Safety

The SPCM-AQ4C contains a **high voltage power supply**. All internal settings are pre-set; there are no user adjustments.

Units which appear defective or have suffered mechanical damage should not be used because of possible electrical shorting of the high-voltage power supply.

Warranty

A standard 12-month warranty following shipment applies. Any warranty is null and void if the module case has been opened.

ESD warning

Modules should only be handled at an ESD safe work station.

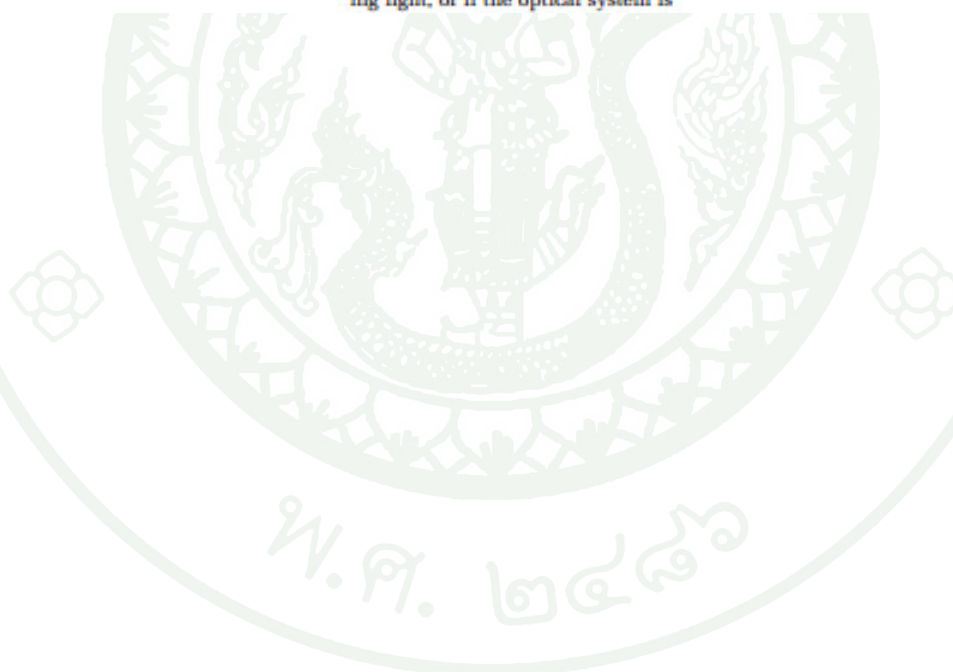


Table 1. Specifications SPCM-AQ4C at 22°C, all models, unless otherwise indicated

Parameter		Minimum	Typical	Maximum	Units
Supply currents:	at +2 V		1.0	4.0*	Amps
	at +5 V		0.20	3.0**	Amps
	at +30 V		0.01	1.0**	Amps
Maximum power consumption	at +2 V		2	6**	Watts
	at +5 V		1	5**	Watts
	at +30 V		0.3	1.2**	Watts
Supply voltages		1.95	2	2.05	V
		4.75	5	5.25	V
		29	30	31	V
Operating temperature (heatsink)		5		40	°C
Photon detection efficiency (per channel)	at 400nm	1	2.5		%
	at 650nm	45	60		%
	at 830nm	35	45		%
	at 1060nm	1	2		%
Average Pd variation per channel at constant heat sink temperature (6 hrs at 25°C)			±1	±3	%
Average Pd variation per channel at 5°C to 40°C heat sink temperature			±4	±10	%
Dark count (per channel)				500	Counts/Sec.
Average dark count variation per channel at constant heat sink temperature (6 hours at 25°C)				±10	%
Average dark count variation per channel at 5°C to 40°C heat sink temperature				±20	%
Dead time (Count rates below 5 Mc/s) nanoseconds			50		ns
Output pulse width			25		ns
Maximum count rate (per channel)	Continuous		1.5		Mc/s
	500ms duration, 25% duty cycle		4		Mc/s
Afterpulsing probability			0.3	0.5	%
Gate threshold voltage (at $V_{Sup}=5V$)					
Low level (sink 5mA) = Gate On			0	0.4	V
High level = Gate Off			3.5	5.25	V
Gate turn-on delay before first edge of true output pulse			60	75	ns
Gate turn-off delay for minimum last output pulse width of 10ns			4	15	ns
Linearity correction factor [7] See fig. 3					
at 200 kc/s			1.01	1.10	
at 1 Mc/s			1.08	1.15	
at 1.5 Mc/s			1.12	1.20	

Absolute maximum ratings

Parameter	Maximum	Units
Supply voltage +2 V	2.1	V
+5 V	5.5	V
+30V	31.5	V
Mean count rate, continuous (per channel)	2	Mc/s
Peak count rate, at 25% duty cycle to 500ms (per channel)	5	Mc/s
Peak light intensity (per channel)	Maximum 10^4 photon/pulse and pulse width less than 1ns	
Temperature: -45° to 50°C storage, 5°C to 40°C operating heat sink.		

Operating Instructions

1. Connection to incorrect voltage or reverse voltage may destroy the module. If such damage occurs, the warranty becomes invalid.
2. These modules are not qualified for shock or vibration other than normal instrumentation environments.
3. The module dissipates a mean power of 3.5W, and a maximum power of 14W at high count rate and 40° C. Adequate heat sinking must be provided by clamping the module to a suitable heat sink via the holes in the module base. For the specification performance, the module case temperature must not exceed 40° C.
4. Bi-stability of the dark count: On a small percentage of delivered modules, bi-stability of the dark count has been observed.

Research indicates that this bi-stability is probably due to transitions at a single impurity site between a low energy and a high energy state. The phenomenon is seen as an abrupt change in the dark count rate, e.g. 350 to 390 c/s, and the dark count switches between the two states at a rate dependent on the detector temperature. Multilevel switching has also been observed, where more than one impurity site is switching.

5. Long-term bi-stability is related to fundamental semiconductor physics and is outside PerkinElmer's control. Warranty claims will not be entertained against bi-stability alone. Warranty claims will only be considered if the high level of the dark count exceeds the maximum level in the specification.

6. In the dark, the module generates random counts that follow a Poisson distribution. In a Poissonian process, the standard deviation is equal to the square root of the average counts. In this specification, the "dark count variation" refers to the stability of the average count of the module.
7. When connecting power to the module, good grounding techniques must be observed. All ground connections for the +30V and +5V supplies should connect through a single point on the user's interface. All ground pins on the card edge connector should be used. The +2V grounds should be connected together at a single point, but should be separate and isolated from the grounds of the other supplies.
8. The actual photon rate could be calculated using the following equation, as indicated below:

$$\text{ACTUALCOUNT RATE Photons} = \frac{(\text{OUTPUT ModuleCountRate} \times \text{CORRECTIONFACTOR @ the Module CountRate}) - \text{DARK COUNT Module}}{\text{PHOTON DETECTION EFFICIENCY Module}}$$

The theoretical value, at low count rate, of the Correction Factor follows this equation:

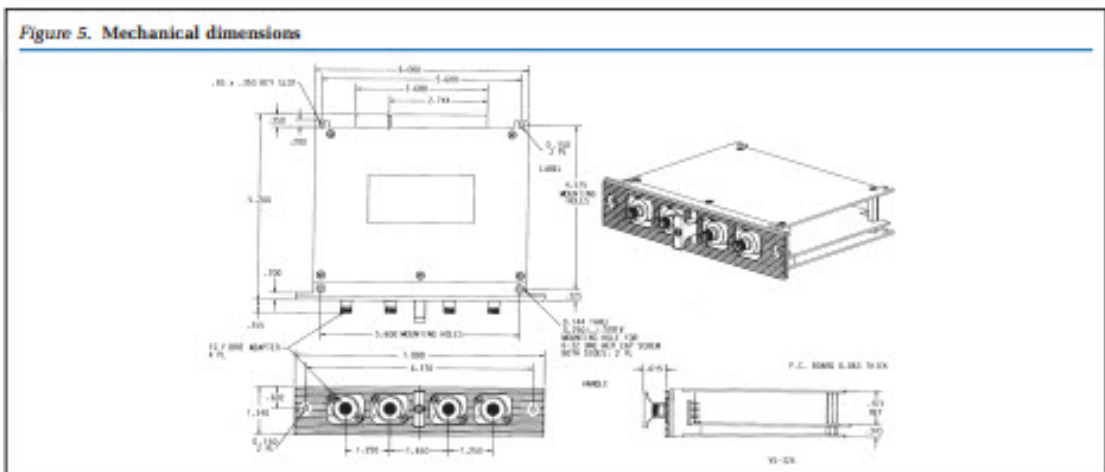
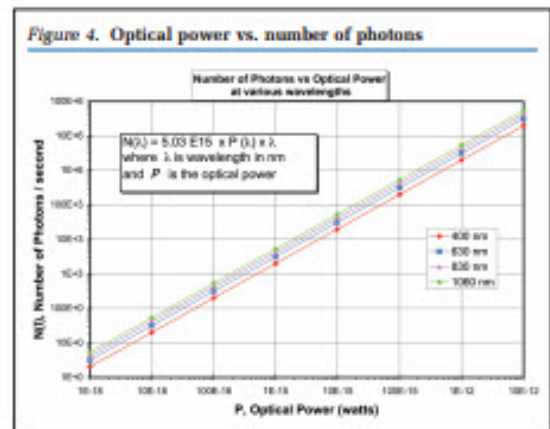
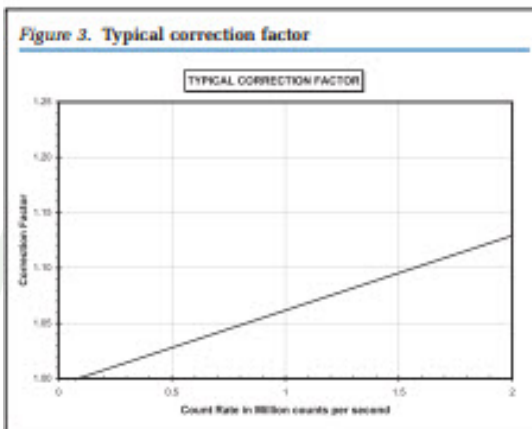
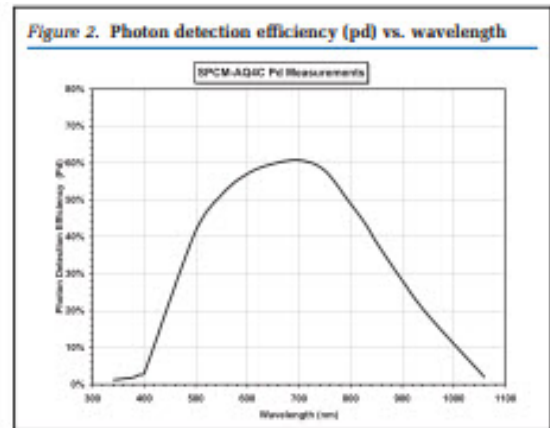
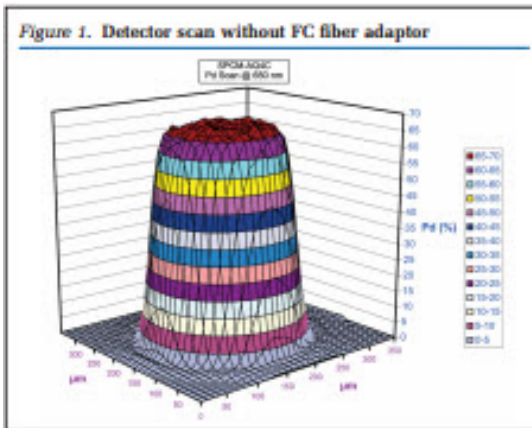
$$\text{Correction Factor} = \frac{1}{1 - (t_d \times C_p)} \quad \text{Where: } t_d = \text{Module Dead Time}$$

$$C_p = \text{Output Count Rate}$$

The deviation from an ideal linear system is another way of looking at the saturation effect. The following equations show how to calculate this departure from the linearity:

$$\text{LINEARITY} = \frac{\text{OUTPUT ModuleCountRate}}{(\text{PHOTONS Actual Count Rate} \times \text{PHOTON DETECTION EFFICIENCY Module}) + \text{DARK COUNT Module}} - 1$$

$$= \frac{1}{\text{Correction Factor}} - 1$$





ภาคผนวก ข
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย



ภาพผนวกที่ ข1 เลเซอร์ไดโอด รุ่น LQA405-50E ผลิตโดยบริษัท Newport



ภาพผนวกที่ ข2 เลเซอร์ไดรเวอร์ ผลิตโดยบริษัท Newport



ภาพผนวกที่ ข3 ตัวกรองแสงสีน้ำเงินชนิดผ่านแถบความถี่ รุ่น FGB37-A ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข4 โพลาริเซอร์เชิงเส้น รุ่น LPVIS050 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข5 โพลารไรเซอร์เชิงเส้น รุ่น 05LP-VIS-B ผลิตโดยบริษัท Newport



ภาพผนวกที่ ข6 ตัวกรองแสงย่านตามองเห็นชนิดผ่านแถบความถี่ รุ่น FB810-10 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข7 แผ่นครึ่งคลื่นอันดับที่ศูนย์ ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข8 ผลึกหักเหสองแนว ชนิด BBO ผลิตโดยบริษัท FOCtek



ภาพผนวกที่ ข9 ตัวยึดเลนส์ รุ่น LH-1 ผลิตโดยบริษัท Newport



ภาพผนวกที่ ข10 ตัวยึดอุปกรณ์ทางแสงเคลื่อนที่ได้ 6 ทิศทาง รุ่น K6X ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข11 ตัวยึดโพลาริเซอร์แบบหมุนปรับได้ รุ่น RM25A ผลิตโดยบริษัท Newport



ภาพผนวกที่ ข12 ตัวยึดโพลาริเซอร์แบบหมุนปรับได้ รุ่น RSP1 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข13 ฐานวางปลอกตัวยึดอุปกรณ์ทางแสง รุ่น BA1S ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข14 ตัวยึดอุปกรณ์ทางแสง รุ่น TR20/M ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข15 ปลอกตัวยึดอุปกรณ์ทางแสง รุ่น PH3 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข16 แท่งขีดอลูมิเนียม รุ่น P10 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข17 ฐานวางเลเซอร์ไดโอด รุ่น C1503 ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข18 ตัวเลื่อนได้ 3 แกน รุ่น PT3/M ผลิตโดยบริษัท Thorlabs



ภาพผนวกที่ ข19 มัลติมิเตอร์ รุ่น 112 ผลิตโดยบริษัท Fluke



ภาพผนวกที่ ข20 มัลติมิเตอร์ รุ่น HP973A ผลิตโดยบริษัท Hewlett Packard



ภาพผนวกที่ ข21 เส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด ผลิตโดยบริษัท Interlink



ภาพผนวกที่ ข22 เครื่องตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว รุ่น SPCM-AQ4C ผลิตโดยบริษัท PerkinElmer



ภาพผนวกที่ ข23 เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่ รุ่น GFG-8015G ผลิตโดยบริษัท GW Instek



ภาพผนวกที่ ข24 ออสซิลโลสโคป รุ่น TDS220 ผลิตโดยบริษัท Tektronix



ภาพผนวกที่ ข25 แหล่งจ่ายไฟ ชนิด 3 แกนที่พุท รุ่น GPC-3030D ผลิตโดยบริษัท GW Instek



ภาพผนวกที่ ข26 เครื่องตรวจวัดความถี่ รุ่น SR620 ผลิตโดยบริษัท Rohde&Schwarz

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายอรรถพล เจริญกุลวณิช
เกิดวันที่	18 เมษายน 2528
สถานที่เกิด	อำเภอห้วยยอด จังหวัดตรัง
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ปัตตานี)
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	รางวัลเรียนดีสาขาฟิสิกส์ของมูลนิธิ ศ.ดร.แถบ นีละนิธิ
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ปี 2547 และปี 2552