



การระบุดำแสงวอร์เท็กซ์ของโฟตอนเดี่ยวโดยใช้ปรากฏการณ์สนามใกล้เคียงของทาลบอต



พิศสุณีย์ ดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การระบุดำแสงวอร์เท็กซ์ของโฟตอนเดี่ยวโดยใช้ปรากฏการณ์สนามใกล้ของทาลบอต



พิศสุนีย์ ตีชื่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

Single-photon vortex beam identification using Talbot near-field effect



PISSUNEE DEECHUEN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF SCIENCE

IN PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

BURAPHA UNIVERSITY

2024

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ พิศุณีย์ ดีชื่น ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....

(สรายุช เดชะปัญญา)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

.....

(สรไกร ศรีศุภผล)

..... ประธาน

(สุรศักดิ์ เชียงกา)

..... กรรมการ

(สรายุช เดชะปัญญา)

..... กรรมการ

(สรไกร ศรีศุภผล)

..... กรรมการ

(สิทธิ บัวทอง)

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ แจ่มเอียด)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

64910186: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: ออปติคัลวอร์เท็กซ์, ควอนตัม, โฟตอนเดี่ยว, สัญญาณพัลส์แคบ, ปรากฏการณ์
ทาลบอต, การแทรกสอดสนามใกล้, รั้วรอยการแทรกสอด

พิเศษนี้ย ดิชั่น : การระบุลำแสงวอร์เท็กซ์ของโฟตอนเดี่ยวโดยใช้ปรากฏการณ์สนามใกล้
ของทาลบอต. (Single-photon vortex beam identification using Talbot near-field effect)
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สราวุธ เดชะปัญญา, สรไกร ศรีสุภผล ปี พ.ศ. 2567.

การตรวจวัดวอร์เท็กซ์ของโฟตอนเดี่ยวสามารถทำได้ด้วยการใช้รั้วรอยการแทรกสอด
ของปรากฏการณ์ทาลบอตในฟิล์มสนามใกล้แบบสองเกรตติง ซึ่งแหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยวใช้วิธี
ลดทอนแสงจากวงจรสัญญาณพัลส์แคบ และสร้างวอร์เท็กซ์ของแสงด้วยแผ่นสร้างวอร์เท็กซ์ (VHWR)
เกรตติงสองตัวถูกใช้เพื่อแยกแยะความแตกต่างของสถานะวอร์เท็กซ์ของแสงโดยมีลักษณะเป็นเหมือน
หน้ากากที่อยู่หน้าอะวาแลนซ์โฟโตไดโอด (APD) สำหรับรับสัญญาณ ด้วยวิธีนี้จึงสามารถระบุสถานะ
วอร์เท็กซ์ของสัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับได้ทั้งเครื่องหมายและขนาดของโมเมนตัมเชิงมุมของ
แสงนี้ โดยที่ไม่ต้องใช้กล้องตรวจจับโฟตอนเดี่ยวราคาสูงมาก

64910186: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: Optical vortex, Quantum, Single-Photon, Short-Pulse, Talbot effect, Near-field, Interference pattern

PISSUNEE DEECHUEN : SINGLE-PHOTON VORTEX BEAM IDENTIFICATION USING TALBOT NEAR-FIELD EFFECT. ADVISORY COMMITTEE: SARAYUT DEACHAPUNYA, SORAKRAI SRISUPHAPHON 2024.

Detection of single-photon vortex using two-grating near-field Talbot effect. The weak coherent pulse (WCP) method is used for the single photon source. A vortex half-wave retarder (VHWR) is then used to generate the optical vortex. Two gratings are used as a mask to identify the states of an optical vortex before an avalanche photodiode (APD) is used as the detector. Then we can use single-photon count rates to identify charge and order of orbital angular momentum (OAM) without using an expensive single-photon image detection.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ เดชะปัญญา และ รองศาสตราจารย์ ดร.สรไกร ศรีศุภผล อาจารย์ที่ปรึกษาผู้คอยให้คำชี้แนะ ทั้งแนวทางการปฏิบัติ และแนวทางตามทฤษฎี เสนอโอกาสที่ดีที่เห็นว่าจะก่อประโยชน์แก่ตัวข้าพเจ้า ทั้งยังแนะนำแนวทางที่จะเกิดประโยชน์ทั้งด้านการศึกษาและการต่อยอดในอนาคตแก่ข้าพเจ้าเสมอ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิ บัวทอง ผู้คอยให้ความช่วยเหลือ และยังเป็นผู้ที่อธิบายเรื่องยากให้ข้าพเจ้าสามารถเข้าใจได้ง่าย รวมทั้งขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เชียงกา ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับเครื่องตรวจจับโฟตอนเดี่ยว และให้ความร่วมมือในการใช้เครื่องตรวจจับโฟตอนเดี่ยวนี้ ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา รวมทั้งพี่สาวของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งคอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอ ขอขอบคุณ คุณจิรภัทร จันทร์พูล, คุณจตุพร นิสัยเชื้อ ผู้ซึ่งคอยช่วยเหลือให้ความรู้ แนวทางการทำงาน รวมทั้งการดำเนินการต่างๆระหว่างการศึกษาวิจัย ท้ายที่สุดนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณตัวข้าพเจ้าที่ไม่ยอมแพ้ระหว่างทางการศึกษา มุ่งมั่น อดทน นำคำดำหนิติมที่ได้รับมาปรับปรุงตัวเพื่อให้เป็นคนที่ดีพัฒนาขึ้น

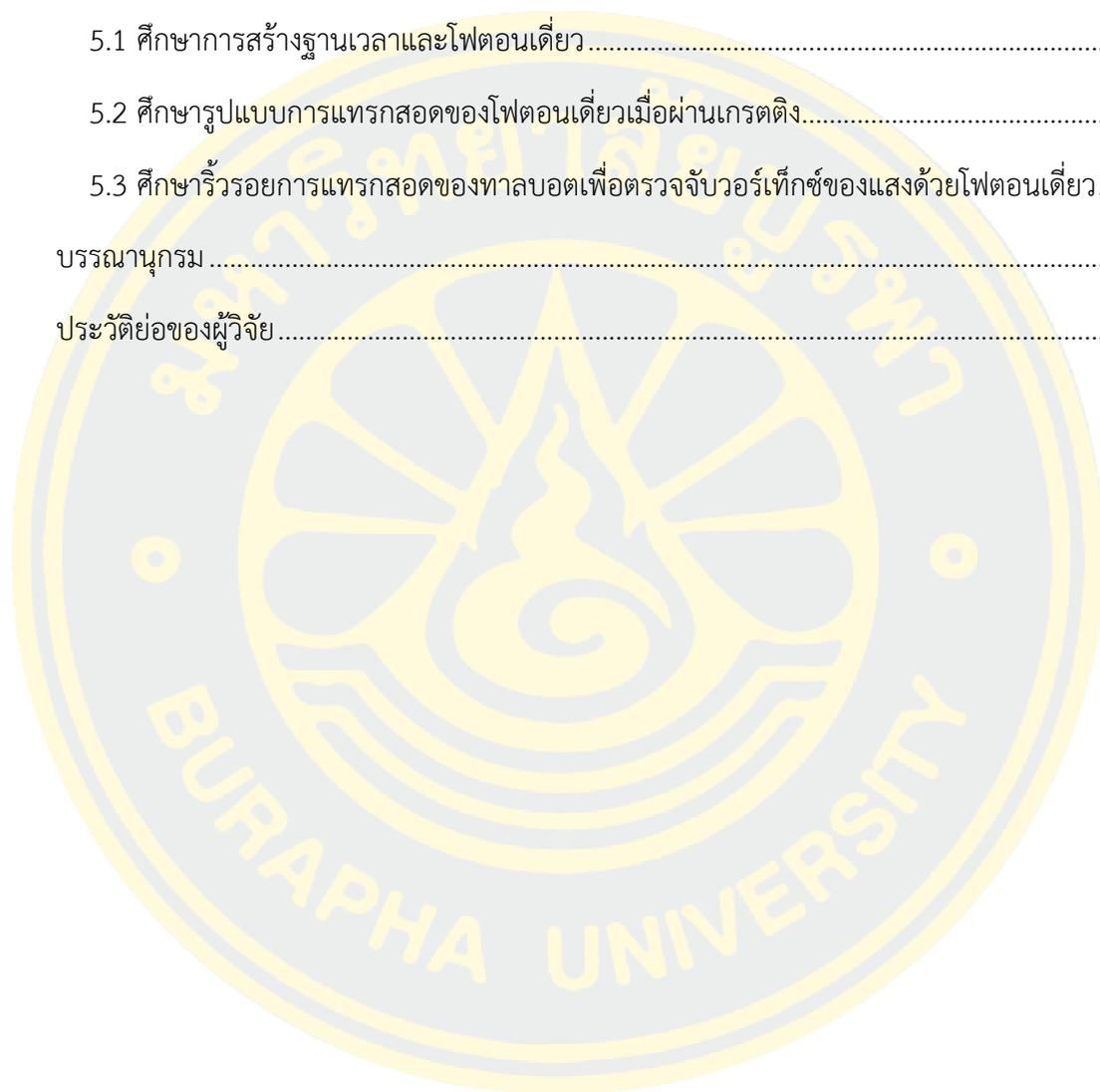
พิศสุณีย์ ดิษฐ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1.....	4
ที่มาและความสำคัญ.....	4
วัตถุประสงค์.....	6
ขอบเขต.....	6
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2.....	7
ธรรมชาติของแสง.....	7
โพลาไรเซชัน (Polarization).....	7
แคลคูลัสของโจนส์ (Jones calculus).....	9
L.A.S.E.R.....	12
โฟตอนเดี่ยว.....	15
แหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยว.....	15
Quantize second-order correlation function.....	15
วอร์เท็กซ์ของแสง.....	17
ลำวอร์เท็กซ์ (Vortex beam :VBs).....	17
การเลี้ยวเบนของวอร์เท็กซ์เชิงแสงในย่านสนามใกล้.....	17
อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด (Avalanche Photodiode:APD).....	20

APD คืออะไร.....	20
การสร้าง APD	20
หลักการทํางาน.....	21
ลักษณะของ APD.....	22
ข้อดีและข้อเสียของ APD	22
ข้อดี 22	
ข้อเสีย 22	
สัญญาณมืด (Dark count)	22
บทที่ 3	23
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	23
วิธีการทดลอง.....	23
ภาคส่ง	24
วงจรรีเลย์ทรอนิกส์.....	24
อุปกรณ์ทัศนศาสตร์	25
การสร้างลำแสงวอร์เท็กซ์	26
อุปกรณ์ทัศนศาสตร์	26
การตรวจจับและระบุวอร์เท็กซ์ของโฟตอนเดี่ยว	27
ภาครับ.....	28
รูปแบบการแทรกสอดของโฟตอนเดี่ยว	28
รื้อรอยการแทรกสอดของทาลบอตเพื่อตรวจจับวอร์เท็กซ์ของแสงด้วยโฟตอนเดี่ยว ...	28
บทที่ 4	30
4.1 ผลการดำเนินงานวิจัยในส่วนของภาคส่ง	30
4.2 ผลการดำเนินงานวิจัยในส่วนของภาครับ.....	32
4.2.1 สัญญาณมืด (Dark-count)	32

4.2.2 รูปแบบการแทรกสอดของโฟตอนเดี่ยว.....	33
4.2.3 การระบุมอร์เท็กซ์ของแสง.....	34
บทที่ 5	38
5.1 ศึกษาการสร้าฐานเวลาและโฟตอนเดี่ยว.....	38
5.2 ศึกษารูปแบบการแทรกสอดของโฟตอนเดี่ยวเมื่อผ่านเกรตติง.....	38
5.3 ศึกษาวิธีรอยการแทรกสอดของทาลบอตเพื่อตรวจจ้บวมอร์เท็กซ์ของแสงด้วยโฟตอนเดี่ยว.....	39
บรรณานุกรม	40
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	45



สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1: แสงประกอบไปด้วยคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กที่ทำมุมตั้งฉากกัน โดยแสงนี้มีทิศทางในแนวตั้งเนื่องจากสนามไฟฟ้าสั่นในทิศขึ้นลงในแนวแกน z [41]	7
รูปที่ 2.2: โพลาริซของคลื่นแสงในทิศทางแนวนอน[41]	7
รูปที่ 2.3: ลักษณะของสนามไฟฟ้าในรูปที่ 2.2 เมื่อเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกตการณ์[41]	8
รูปที่ 2.4: ลักษณะของแสงที่ไม่มีโพลาริซเมื่อเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกตการณ์[41]	8
รูปที่ 2.5: ทิศทางของสนามไฟฟ้าสำหรับ (a) แสงโพลาริซในแนวตั้ง (b) แสงโพลาริซในแนวนอน และ (c) แสงที่ไม่มีโพลาริซที่พุ่งเข้าหาผู้สังเกตการณ์[41]	8
รูปที่ 2.6: ลักษณะของสนามไฟฟ้าของแสงโพลาริซแบบวงกลม (ทิศตามเข็มนาฬิกา) เมื่อเคลื่อนที่ผ่านผู้สังเกตการณ์[41]	9
รูปที่ 2.7: เส้นทางที่ได้จากการติดตามส่วนปลายของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแสงโพลาริซแบบวงกลมสำหรับโพลาริซแบบวงกลมในระนาบ xy หรือสามารถบรรยายทิศทางรวมได้ด้วยกฎมือซ้าย โดยทิศการแพร่ของคลื่นอยู่ในแนวหัวแม่มือ[41]	9
รูปที่ 2.8: (a) อะตอมที่สถานะพื้นถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้นเมื่อดูดกลืนโฟตอน (b) เมื่ออะตอมที่สถานะกระตุ้น โฟตอนที่มาตกกระทบสามารถทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานได้[43]	13
รูปที่ 2.9: (a) โฟตอนสามตัวถูกดูดกลืน ทำให้อะตอมสามตัวถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น (b) ถ้ามีอะตอมครึ่งหนึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้นในตอนต้น โฟตอนแต่ละตัวจะมีโอกาส 50/50 ที่จะถูกดูดกลืน หรือปลดปล่อยพลังงาน (c) ถ้าอะตอมทั้งหมดอยู่ในสถานะกระตุ้น โฟตอนที่ตกกระทบแต่ละตัวจะเกิดความเป็นไปได้ที่จะปลดปล่อยพลังงานออกมา[43]	14
รูปที่ 2.10: ไดอะแกรมทฤษฎีสำหรับการส่งผ่านจากด้านซ้ายไปด้านขวา เมื่อคลื่นเข้ามาพร้อมกับสถานะ $OAM \ell$ ในรูปแบบของฟังก์ชันคลื่น $V \pm \ell$ เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง $G1$ และ $G2$ เกรตติงเหล่านี้แสดงโดยใช้ฟังก์ชันการส่งผ่าน $TG1, 2$ ด้วยการเลื่อนระยะเกรตติง δ ผลจากรีรอยการแทรกสอด ทาลบอดถูกสังเกตได้บนฉากที่ระนาบ xy [47]	19
รูปที่ 2.11: สัญลักษณ์ของ APD[48]	20

รูปที่ 2.12: โครงสร้างของ APD[48].....20

รูปที่ 2.13: หลักการทำงานของ APD[49].....21

บทที่ 3

รูปที่3.1: ไดอะแกรมแสดงวงจรไดโอดเลเซอร์แบบพัลส์แคบ24

รูปที่3.2: วงจรไดโอดเลเซอร์แบบพัลส์แคบ.....24

รูปที่3.3: ไดอะแกรมแสดงอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในส่วนของภาคส่งที่มีการลดทอนแสงประกอบไปด้วย ไดโอดเลเซอร์ (LD), ฟิลเตอร์กรองโพลาไรซ์เชิงแสง (LP), แผ่นฮาล์ฟเวฟ (HWP), เลนส์ (CL), และ ผลึกแยกลำแสงโพลาไรซ์ (PBS).....25

รูปที่3.4: อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในส่วนของภาคส่งที่มีการลดทอนแสง25

รูปที่3.5: ไดอะแกรมแสดงส่วนของการสร้างลำออร์เทิกซ์ที่ประกอบไปด้วย แผ่นควอเตอร์เวฟ (QWP) และแผ่นสร้างออร์เทิกซ์ (VHWR)26

รูปที่3.6: อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในส่วนของสร้างลำออร์เทิกซ์27

รูปที่3.7: ไดอะแกรมแสดงการจัดวางเกรตติงสองตัว G1 และ G2 โดยเกรตติงตัวที่1 (G1) ถูกเลื่อนตามแนวขวางด้วยสแตจเลื่อน (TS2) เพื่อตรวจสอบการเหลื่อมกันระหว่างสองเกรตติง และเกรตติงตัวที่ 2 ที่ทำหน้าที่เป็นหน้าฉากถูกจัดวางบนสแตจเลื่อน (TS3) เพื่อตรวจสอบรูปแบบของร็วรอยการแทรกสอดทาลบอด.....27

รูปที่3.8: อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในส่วนการจัดวางเกรตติงสองตัวที่มีคาบเท่ากันถูกวางเหลื่อมกัน28

รูปที่3.9: อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในส่วนของภาครับประกอบไปด้วยตัวแยกลำแสง (BS), ไฟเบอร์ออปติกตัวที่ 1 และ 2 (F1 และ F2).....29

รูปที่3.10: อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด29

บทที่ 4

รูปที่ 4.1: สัญญาณที่ได้เมื่อผ่านวงจรพัลส์แคบ มีความถี่ของสัญญาณ 1MHz และแอมพลิจูด 2.8 V31

รูปที่ 4. 2: สัญญาณพัลส์แคบมีความกว้างพัลส์ 10 ns31

รูปที่ 4.3: สัญญาณมอดที่มีค่าสัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับได้ 311.876 Hz32

รูปที่ 4.4:รูปแบบการแทรกสอดของโฟตอนเดี่ยวที่รับสัญญาณได้จากเครื่อง APD	33
รูปที่ 4.5: สัญญาณที่ได้โดยที่วอร์เท็กซ์ของแสงมีสถานะ $l = -1$ สัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับ ได้ 3.61203 kHz	34
รูปที่ 4.6: สัญญาณที่ได้โดยที่วอร์เท็กซ์ของแสงมีสถานะ $l = +1$ สัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับ ได้ 3.01545 kHz	35
รูปที่ 4. 7: สัญญาณที่ได้โดยที่วอร์เท็กซ์ของแสงมีสถานะ $l = -2$ สัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับ ได้ 3.24605 kHz	35
รูปที่ 4.8: สัญญาณที่ได้โดยที่วอร์เท็กซ์ของแสงมีสถานะ $l = +2$ สัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับ ได้ 2.20343 kHz	36
รูปที่ 4.9:รูปแบบวีรรอยการแทรกสอดของวอร์เท็กซ์ของแสงที่มีสถานะ $l = +1, l = -1, l = +2$ และ $l = -2$	36

การประยุกต์ใช้ร็อยการแทรกสอดของทาลบอตในฟิสิกส์สนามใกล้ด้วยโฟตอนเดี่ยว

Applications of Single Photon Near-Field Talbot Patterns

บทที่ 1

ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันนี้มีการใช้งานจากประโยชน์ของแสงกันเป็นวงกว้าง โดยแสงนั้นคือรูปแบบของพลังงานที่เคลื่อนที่ในลักษณะของคลื่น โดยจะมีสิ่งที่เรียกว่าความยาวคลื่นของแสงเป็นสิ่งที่ใช้อธิบายถึงคุณสมบัติของคลื่นแสงนั้นๆ ตัวอย่างเช่น สีที่แตกต่างกันของคลื่นแสงเมื่อมีค่าความยาวคลื่นของแสงที่แตกต่างกัน และอันตรกิริยาเมื่อเจอคลื่นแสงนั้นกระทำกับสสารต่างๆ ช่วงของความยาวคลื่นมีตั้งแต่ช่วงที่สั้นไปจนถึงช่วงที่ยาว หรือที่รู้จักกันในชื่อของสเปกตรัม (Spectrum) ของแสง มนุษย์นั้นสามารถมองเห็นคลื่นแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นที่เรียกว่า “ ช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible light) ” โดยมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 นาโนเมตร (ช่วงความยาวคลื่นแสงสีม่วง) ไปจนถึงช่วง 700 นาโนเมตร (ช่วงความยาวคลื่นแสงสีแดง)[1] โดยมีการประยุกต์ใช้งานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ เช่น การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) เพื่อประโยชน์ในการถนอมอาหาร[2], แสงสีฟ้าที่ถูกใช้ในเทคโนโลยีหน้าจอในปัจจุบันตั้งแต่โทรทัศน์ โทรศัพท์ แท็บเล็ต คอมพิวเตอร์ ไปจนถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ [3], หรือการใช้งานด้านการเสริมความงาม[4] และช่วงความยาวคลื่นที่มีการประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายที่สุดในทางการแพทย์นั้นคือช่วงความยาวคลื่นช่วงสีแดง ซึ่งมีทั้งการใช้รักษาสิว[5] การฟื้นฟูผิว[6] การปลูกผม[7] และการรักษาในรูปแบบอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งการค้นพบประโยชน์มากมายของแสงเหล่านี้เกิดจากการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับแสงในรูปแบบต่างๆมาตั้งแต่อดีต โดยนอกจากคุณสมบัติเรื่องสีของแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันแล้วนั้น ในการค้นคว้าวิจัยยังสามารถแบ่งคุณสมบัติของแสงได้เป็นหลายรูปแบบ เพื่อที่จะสามารถทำตามความเหมาะสมในการค้นคว้าวิจัย อาทิเช่น แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นคลื่นแสงอาพันธ์[8] และไม่อาพันธ์[9] แสงโหมดเดี่ยว และแบบหลายโหมด[10] แสงที่โพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม (Circular polarization light)[11] และแสงอีกรูปแบบหนึ่งที่มีการวิจัยค้นคว้ากันอย่างกว้างขวาง นั่นคือการสร้างรูปแบบของแสงที่เรียกว่าวอร์เท็กซ์ของแสง (Optical Vortex)

วอร์เท็กซ์ของแสงหรือที่รู้จักกันในชื่อ เฟส ซิงกูลาริตี (Phase singularity) คือรูปแบบหนึ่งของซิงกูลาริตีของแสง (Optical singularity) ที่มีลักษณะของหน้าคลื่นเป็นแบบเกลียว (Spiral) ซึ่งทำให้ล่าวอร์เท็กซ์เกิดการหมุนบิดเป็นเกลียวรอบแกนของแสงที่แผ่ออกไป โดยวอร์เท็กซ์ของแสงจะมี

คุณสมบัติอย่างหนึ่งที่เรียกว่าประจุโทโพโลจิคอล (Topological charge: l) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ใช้อธิบายจำนวนของการบิดเกลียวของแสงในหนึ่งความยาวคลื่นของการแผ่ออกไป จำนวนของประจุโพลิติคอลนั้นสามารถเป็นบวกหรือเป็นลบขึ้นอยู่กับทิศทางที่แสงนั้นบิดเกลียว เมื่อจำนวนของการบิดเกลียวสูงขึ้นแสดงถึงแสงที่หมุนรอบแกนแบบเร็วขึ้น ลำวอร์เท็กซ์ที่มีคุณสมบัติของประจุโทโพโลจิคอลนั้นมีสิ่งที่เรียกว่าโมเมนตัมเชิงมุมของวงโคจรภายนอก (Orbital Angular Momentum: OAM) เป็น $l\hbar$ [12] ในส่วนของประยุคติใช้งานจากลำวอร์เท็กซ์ของแสงนั้นมีประโยชน์มากมาย เช่นการติดต่อสื่อสารโดยใช้วอร์เท็กซ์ของแสง[13-16], เรดาร์แสง[17], คีมเชิงแสง (Optical tweezer)[18-20], การจับอนุภาคด้วยแสง (Optical trapping)[21-24] และการกำหนดรูปร่างของลำเลเซอร์[25, 26] เป็นต้น ในส่วนของการสร้างวอร์เท็กซ์ของแสงนั้นมีหลายหลายวิธีด้วยกัน ตั้งแต่การใช้แผ่นเฟสที่บิดเกลียว[27-29], กระจกเปลี่ยนรูปได้ (Deformable mirror)[30-32], องค์ประกอบแสงเลี้ยวเบน (Diffractive optical elements: DOEs) และโมดูเลตแสงเชิงพื้นที่ (Spatial light modulators: SLMs) โดยเมื่อสร้างวอร์เท็กซ์ของแสงตามที่ต้องการแล้ว ในส่วนการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้นจำเป็นต้องมีการมีตรวจสอบว่าแสงนั้นเป็นวอร์เท็กซ์ของแสงจริงหรือไม่ ซึ่งวิธีการตรวจสอบและศึกษาพฤติกรรมของวอร์เท็กซ์ของแสงจึงถูกศึกษาในหลายรูปแบบเพื่อที่จะได้ทราบถึงคุณสมบัติไม่ว่าจะเป็นจำนวนของโมเมนตัมเชิงมุมของวงโคจรภายนอก(OAM) และประจุของโทโพโลจิคอล หนึ่งในเทคนิคที่ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาลักษณะของวอร์เท็กซ์ของแสงนั้นคือ การใช้เกรตติง โดยอาศัยคุณสมบัติพิเศษที่เมื่ออยู่ในระยะที่เหมาะสมจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าปรากฏการณ์ทาลบอต

ปรากฏการณ์ทาลบอต(Talbot effect) คือปรากฏการณ์ที่แสดงถึงภาพตนเอง (Self-imaging) ถูกค้นพบครั้งแรกในปี 1830 โดย เอช เอฟ ทาลบอต (H.F. Talbot) โดยปรากฏการณ์ทาลบอตนั้นถูกสังเกตได้เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม จากลำแสงที่ส่งผ่านรูปแบบที่มีลักษณะเป็นคาบเช่น เมื่อลำแสงส่องผ่านเกรตติงเลี้ยวเบน ที่ระยะทาลบอต ภาพที่เกิดขึ้นนี้จะมีลักษณะเกิดเป็นภาพของตนเอง (Self-imaging) เทคนิคนี้ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาและหาวิธีการตรวจจันวอร์เท็กซ์ของแสง ที่ระยะทาลบอต มีการใช้อองค์ประกอบในการเลี้ยวเบนต่างๆไม่ว่าจะเป็น สลิตเดี่ยว (Single slit), สลิตคู่ (Double slit), สลิตหลายช่อง (Multiple slit) และเกรตติงเลี้ยวเบน เพื่อพิสูจน์ว่าปรากฏการณ์ทาลบอตนั้นเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์สำหรับการตรวจจันวอร์เท็กซ์ของแสง[33] นอกจากนี้แล้วยังมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการใชปรากฏการณ์ทาลบอตนี้เช่น การใช้เกรตติงเลี้ยวเบนสองเกรตติงทำการเหลื่อมกันเพื่อลดค่าอัตราส่วนช่องเปิด (Effective open fraction)[34] ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้การตรวจจันวอร์เท็กซ์ของแสงนั้นได้ข้อมูลเรื่องของทิศทาง และโมเมนตัมเชิงมุมของวง

โคจรรอบนอก(OAM) ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ซึ่งการวิจัยเกี่ยวกับแสงนั้นมีการใช้รูปแบบของแหล่งกำเนิดที่ต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับรูปแบบที่ต้องการศึกษาและทดลอง ตั้งแต่การใช้เลเซอร์[35-37], แลมป์ (Lamp)[38, 39], LED (Light emitting diode) ไปจนถึงแหล่งกำเนิดที่เป็นโฟตอนเดี่ยว (Single photon)[40]

ในงานวิจัยนี้ ข้าพเจ้าจะกล่าวถึงทฤษฎีวอร์เท็กซ์ของแสง เทคนิคจากปรากฏการณ์ทาลบอต และแหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยวที่ใช้ในการทดลองในบทที่สอง ในบทที่สามจะแสดงถึงวิธีการและการใช้เทคนิคจากปรากฏการณ์ทาลบอตสนามเกล็ดแบบสองเกรตติงที่มีหน้าฉากในการตรวจวัดแยกแยะวอร์เท็กซ์ของแสงโฟตอนเดี่ยวทำให้ไม่ต้องใช้กล้องรับภาพของโฟตอนเดี่ยวที่มีราคาสูงได้ โดยผลการทดลองที่ได้มาจากเครื่องมือตรวจจับ APD และการอธิบายผลลัพธ์ที่ได้จะถูกกล่าวถึงในบทที่สี่และห้าตามลำดับ

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้รีวอยการแทรกสอดของทาลบอตเพื่อตรวจจับวอร์เท็กซ์ของแสงในพิสัยสนามเกล็ดด้วยโฟตอนเดี่ยว

ขอบเขต

1. ใช้แหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยว
2. ใช้เกรตติงเลี้ยวเบนที่มีขนาดคาบของเกรตติงเป็น 200 ไมโครเมตร
3. ใช้ APD เป็นเครื่องมือในการตรวจจับโฟตอนเดี่ยว

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถตรวจวัดแยกแยะวอร์เท็กซ์ของแสงโฟตอนเดี่ยว โดยใช้รีวอยการแทรกสอดของทาลบอตแบบสองเกรตติง ทำให้ไม่ต้องใช้กล้องสำหรับโฟตอนเดี่ยวที่มีราคาสูงมาก

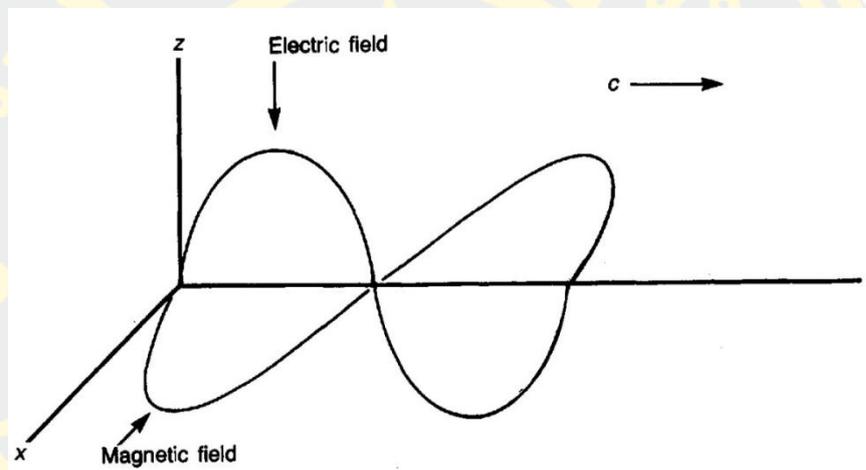
บทที่ 2

เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ธรรมชาติของแสง

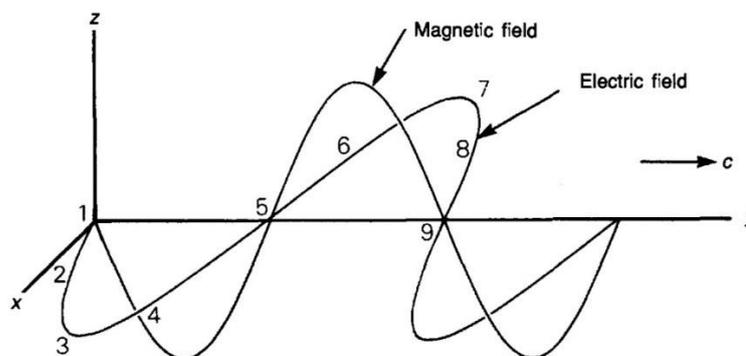
โพลาไรเซชัน (Polarization)

แสงประกอบด้วยคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กในลักษณะที่ตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โพลาไรเซชันของแสงคือทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น แสงในรูปที่ 2.1 เป็นระนาบโพลาไรซ์เนื่องจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแกว่งแกนใดแกนหนึ่งเท่านั้น[41]



รูปที่ 2.1: แสงประกอบไปด้วยคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กที่ทำมุมตั้งฉากกัน โดยแสงนี้มีทิศทางในแนวตั้งเนื่องจากสนามไฟฟ้าสั่นในทิศขึ้นลงในแนวแกน z[41]

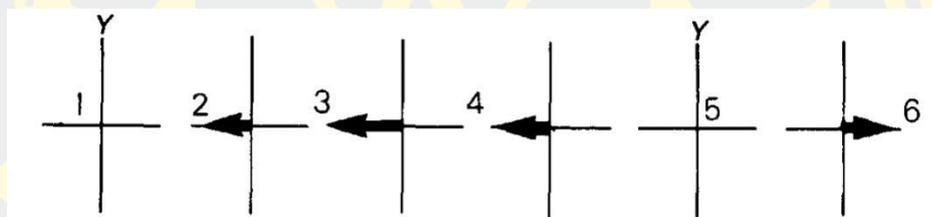
เนื่องจากระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวตั้งจะถือว่าแสงมีโพลาไรซ์ในแนวตั้ง แต่ถ้าแสงโพลาไรซ์ในแนวนอนจะแสดงในรูปที่ 2.2



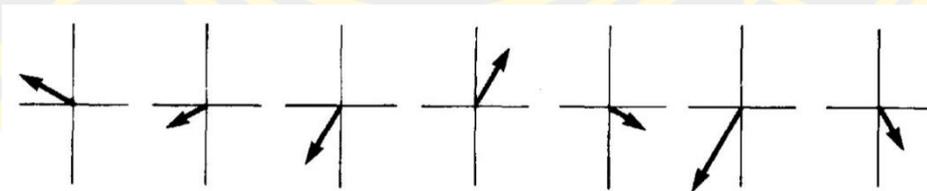
รูปที่ 2.2: โพลาไรซ์ของคลื่นแสงในทิศทางแนวนอน[41]

รูปที่ 2.2 เป็นภาพของสนามแม่เหล็กในคลื่นแสง โดยมีสนามไฟฟ้าที่กำหนดโพลาไรซ์ของแสง เนื่องจากหากลองมองภาพตามทิศทางที่แสงเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกตการณ์จะพบว่า ภาพที่เห็นนั้นจะไม่ใช้ลักษณะที่เป็นสนามไฟฟ้า แต่เป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นและลดลงในทางซ้ายและขวาตามที่แสดงในรูปที่ 2.3 ในหลายๆรอบ และจะเห็นการทำงานของสนามไฟฟ้าตามที่แสดงในรูปที่ 2.5b

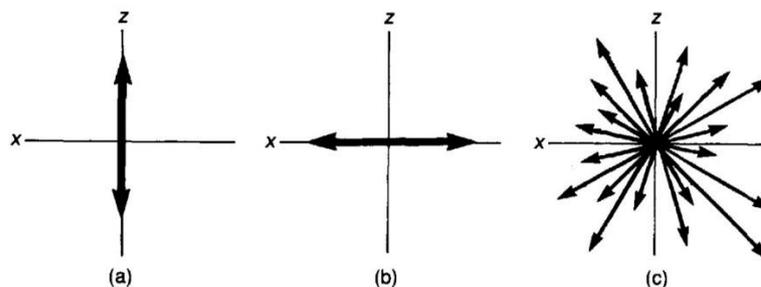
ในทางกลับกัน แสงที่ไม่มีโพลาไรซ์จะพุ่งตรงมาที่ผู้สังเกตการณ์เช่นเดียวกับรูปที่ 2.4 ทิศทางและความกว้างของสนามไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาใดๆ จะเป็นแบบสุ่ม เมื่อเกิดขึ้นรอบหลายๆ รอบ จะสังเกตได้ว่าสนามไฟฟ้ามีพฤติกรรมดังแสดงในรูปที่ 2.5c ที่จุดของเวกเตอร์สนามสุ่มที่ออกไปในทิศทางสุ่ม



รูปที่ 2.3: ลักษณะของสนามไฟฟ้าในรูปที่ 2.2 เมื่อเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกตการณ์[41]

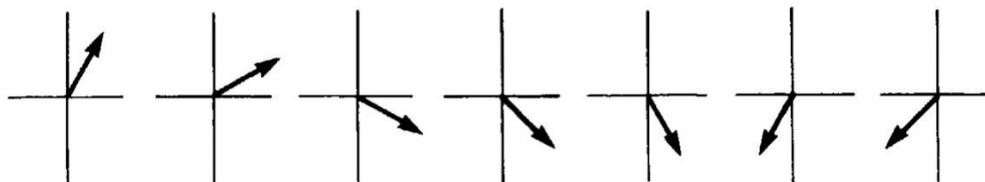


รูปที่ 2.4: ลักษณะของแสงที่ไม่มีโพลาไรซ์เมื่อเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกตการณ์[41]

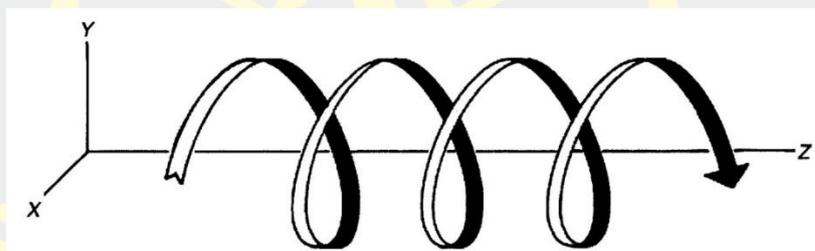


รูปที่ 2.5: ทิศทางของสนามไฟฟ้าสำหรับ (a) แสงโพลาไรซ์ในแนวตั้ง (b) แสงโพลาไรซ์ในแนวนอน และ (c) แสงที่ไม่มีโพลาไรซ์ที่พุ่งเข้าหาผู้สังเกตการณ์[41]

มีโพลาไรซ์อีกประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญคือโพลาไรซ์แบบวงกลมเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกตการณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อเกิดขึ้นหลายๆรอบ จะเห็นสนามไฟฟ้ามีพฤติกรรมดังแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 แสงโพลาไรซ์แบบระนาบ สามารถมีโพลาไรซ์ได้ในทุกแนว เช่นเดียวกับแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมที่สามารถมีโพลาไรซ์แบบตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้เช่นกัน



รูปที่ 2.6: ลักษณะของสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์แบบวงกลม (ทิศตามเข็มนาฬิกา) เมื่อเคลื่อนที่ผ่านผู้สังเกตการณ์[41]



รูปที่ 2.7: เส้นทางที่ได้จากการติดตามส่วนปลายของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมสำหรับโพลาไรซ์แบบวงกลมในระนาบ xy หรือสามารถบรรยายทิศทางวนได้ด้วยกฎมือซ้าย โดยทิศทางแพร่ของคลื่นอยู่ในแนวหัวแม่มือ[41]

แคลคูลัสของโจนส์ (Jones calculus)

ในด้านทัศนศาสตร์ แสงโพลาไรซ์สามารถอธิบายได้ด้วยการใช้แคลคูลัสโจนส์ ซึ่งคิดค้นโดยอาร์.ซี. โจนส์ (R.C. Jones) แสงโพลาไรซ์ถูกแสดงด้วยเวกเตอร์ของโจนส์ และอุปกรณ์แสงเชิงเส้นถูกแสดงด้วยเมทริกซ์ของโจนส์ [42]

เวกเตอร์ของโจนส์ (Jones vector)

เมื่อลำแสงแพร่กระจายในตัวกลางที่มีไอโซโทรปิกและเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อแสงเคลื่อนที่ตามทิศทางในแนวแกน Z ด้วยความถี่ ω และเวกเตอร์คลื่น $\mathbf{k}=(0,0,k)$ เมื่อเลขคลื่น $k=\omega/c$ จากนั้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก E และ B จะตั้งฉากกับ \mathbf{k} ที่แต่ละจุด นอกจากนี้ B ยังถูกกำหนดได้

จาก E ด้วยมุม 90 องศา ดังนั้นโพลาไรซ์ของแสงสามารถดูได้จาก E โดยที่แอมพลิจูดเชิงซ้อนของ E สามารถเขียนได้ว่า[42]

$$\begin{pmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i(kz - \omega t + \phi_x)} \\ E_{0y} e^{i(kz - \omega t + \phi_y)} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\phi_x} \\ E_{0y} e^{i\phi_y} \\ 0 \end{pmatrix} e^{i(kz - \omega t)} \quad 2.1$$

ในที่นี้ i คือส่วนจินตภาพด้วย $i^2 = -1$

โจนส์เวกเตอร์คือ

$$\begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\phi_x} \\ E_{0y} e^{i\phi_y} \end{pmatrix} \quad 2.2$$

ดังนั้นเวกเตอร์โจนส์จึงแทนแอมพลิจูดและเฟสของสนามไฟฟ้าในทิศ x และ y

ผลรวมของกำลังสองของค่าสัมบูรณ์ของส่วนประกอบทั้งสองของเวกเตอร์ของโจนส์เป็นสัดส่วนของความเข้มของแสง จึงทำการปรับให้มีค่าเป็น 1 ที่จุดเริ่มต้นเพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น และจะต้องทำให้องค์ประกอบแรกของเวกเตอร์ของโจนส์ให้เป็นจำนวนจริง

ตารางต่อไปนี้แสดง 6 ตัวอย่างของเวกเตอร์ของโจนส์

Polarization	Jones vector	Typical ket notation
โพลาไรซ์เชิงเส้นที่มุม α (วัดจากแกน x)	$\begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix}$	
โพลาไรซ์เชิงเส้นในทิศแกน x หรือที่เรียกว่า แนวนอน	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$ H\rangle$
โพลาไรซ์เชิงเส้นในทิศแกน y หรือที่เรียกว่า แนวตั้ง	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$ V\rangle$
โพลาไรซ์เชิงเส้นที่มุม 45 องศาจากแกน x หรือที่เรียกว่า เส้นทแยงมุม L+45	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$	$ D\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (H\rangle + V\rangle)$
โพลาไรซ์เชิงเส้นที่มุม -45 องศาจากแกน x หรือที่เรียกว่า ตรงข้ามเส้นทแยงมุม L-45	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$	$ A\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (H\rangle - V\rangle)$

โพลาไรซ์วงกลมมือขวา RHCP	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$	$ R\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (H\rangle - i V\rangle)$
โพลาไรซ์วงกลมมือซ้าย LHCP	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ +i \end{pmatrix}$	$ L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (H\rangle + i V\rangle)$

เวกเตอร์ทั่วไปที่ชี้ไปยังตำแหน่งใดๆบนพื้นผิวเขียนเป็นเคท $|\psi\rangle$ เมื่อใช้ทรงกลม Poincare sphere (หรือที่รู้จักกันในชื่อ Bloch sphere) จะใช้เคท $|0\rangle$ และ $|1\rangle$ จะต้องถูกกำหนดให้กับคู่ของเคทที่ระบุไว้ด้านบน ตัวอย่างเช่น $|0\rangle = |H\rangle$ และ $|1\rangle = |V\rangle$ โดยที่คู่ตรงข้ามคือ

$|H\rangle$ และ $|V\rangle$

$|D\rangle$ และ $|A\rangle$

$|R\rangle$ และ $|L\rangle$

ถ้าโพลาไรซ์ของจุดใดๆไม่เท่ากับ $|R\rangle$ หรือ $|L\rangle$ และไม่อยู่บนวงกลมที่ผ่าน $|H\rangle$, $|D\rangle$, $|V\rangle$, $|A\rangle$ เรียกว่าโพลาไรซ์ทรงรี[42]

เมทริกซ์ของโจนส์ (Jones Matrices)

เมทริกซ์ของโจนส์เป็นตัวดำเนินการที่กระทำกับเวกเตอร์ของโจนส์ โดยเมทริกซ์เหล่านี้ถูกนำไปใช้โดยอุปกรณ์ต่างๆของแสงเช่น ตัวกรองโพลาไรซ์เชิงเส้น (LP), แผ่นฮาล์ฟเวฟ, แผ่นควอเตอร์เวฟ และอื่นๆ แต่ละเมทริกซ์แสดงถึงการฉายภาพลงบนสเปซย่อยเชิงซ้อนของเวกเตอร์ของโจนส์[42]

ตารางแสดงตัวอย่างของเมทริกซ์ของโจนส์สำหรับโพลาไรซ์

Optical element	เมทริกซ์โจนส์
ตัวกรองโพลาไรซ์เชิงเส้น (LP) พร้อมแกนของการส่งผ่านแนวนอน	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
ตัวกรองโพลาไรซ์เชิงเส้น (LP) พร้อมแกนของการส่งผ่านแนวตั้ง	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
ตัวกรองโพลาไรซ์เชิงเส้น (LP) พร้อมแกนของการส่งผ่านที่มุม ± 45 องศา กับแนวนอน	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \pm 1 \\ \pm 1 & 1 \end{pmatrix}$

ตัวกรองโพลาไรซ์เชิงเส้น (LP) พร้อม แกนของการส่งผ่านที่มุม θ กับแนวนอน	$\begin{pmatrix} \cos^2(\theta) & \cos(\theta)\sin(\theta) \\ \cos(\theta)\sin(\theta) & \sin^2(\theta) \end{pmatrix}$
ตัวกรองโพลาไรซ์แบบวงกลมด้านขวา	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{pmatrix}$
ตัวกรองโพลาไรซ์แบบวงกลมด้านซ้าย	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{pmatrix}$
แผ่นควอเตอร์เวฟด้วยแกนเร็วแนวตั้ง	$e^{\frac{i\pi}{4}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$
แผ่นควอเตอร์เวฟด้วยแกนเร็วแนวนอน	$e^{-\frac{i\pi}{4}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$
แผ่นควอเตอร์เวฟด้วยแกนเร็วที่มุม θ เทียบกับแกนนอน	$e^{-\frac{i\pi}{4}} \begin{pmatrix} \cos^2\theta + i\sin^2\theta & (1-i)\sin\theta\cos\theta \\ (1-i)\sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta + i\cos^2\theta \end{pmatrix}$
แผ่นฮาล์ฟเวฟที่ถูกหมุนโดยมุม θ	$\begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix}$
แผ่นฮาล์ฟเวฟด้วยแกนเร็วที่มุม θ เทียบ กับแกนนอน	$e^{-\frac{i\pi}{2}} \begin{pmatrix} \cos^2\theta - \sin^2\theta & 2\cos\theta\sin\theta \\ 2\cos\theta\sin\theta & \sin^2\theta + \cos^2\theta \end{pmatrix}$
แผ่นคลื่นทั่วไป	$e^{-\frac{i\eta}{2}} \begin{pmatrix} \cos^2\theta + e^{i\eta}\sin^2\theta & (1 - e^{i\eta})\cos\theta\sin\theta \\ (1 - e^{i\eta})\cos\theta\sin\theta & \sin^2\theta + e^{i\eta}\cos^2\theta \end{pmatrix}$

L.A.S.E.R

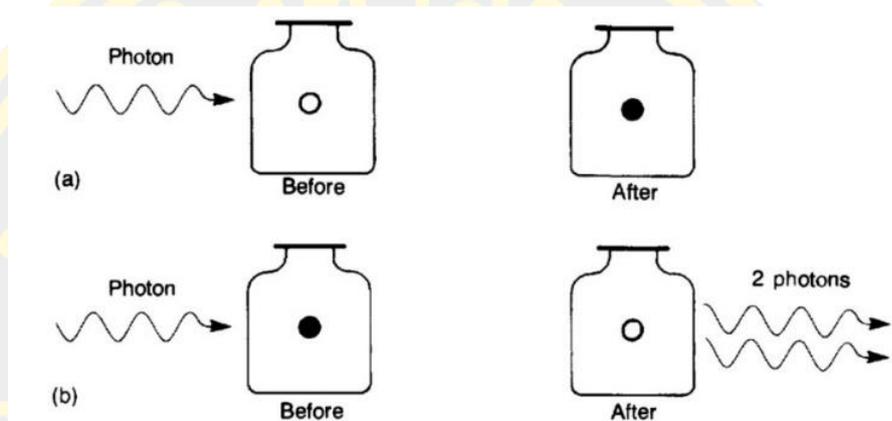
อย่างที่ทราบกันดีว่าตัวอักษรในคำว่าเลเซอร์ (LASER) นั้นหมายถึง การขยายแสงโดยการกระตุ้นการปล่อยรังสี หรือ L.A.S.E.R. ย่อมาจาก Light amplification by stimulated emission of radiation [43]

โดยเราจะสมมติว่ามีโหลหนึ่งใบ ใส่อะตอมไว้ก่อนที่จะนำอะตอมเหล่านี้ออกมา อะตอมเหล่านี้จะอยู่ที่สถานะพื้นหรือ E_0 เมื่อนำออกมาแล้วนั้นอะตอมจะออกมาพร้อมกับพลังงานที่อยู่ระหว่างชั้นของพลังงานนั้นคือ

$$\frac{hc}{\lambda} = E_1 - E_0 \quad 2.3$$

โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของโฟตอน เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานที่เหมาะสม โฟตอนนั้นจะสามารถถูกดูดกลืนพลังงานได้โดยอะตอมจากนั้นอะตอมนั้นจะขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น (E_1) ตามที่แสดงในรูปที่

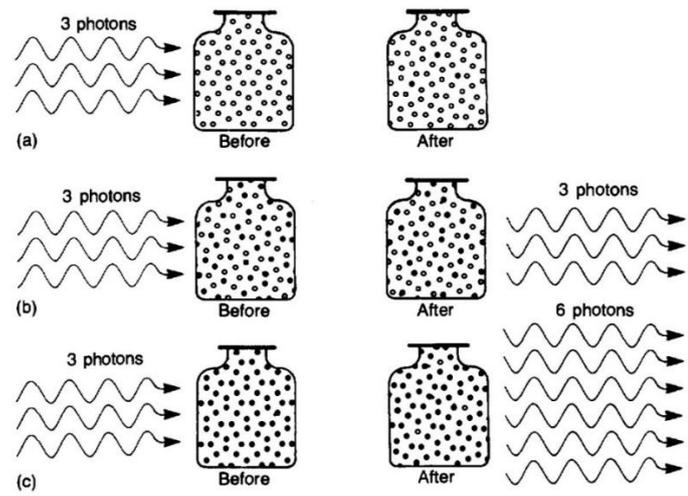
2.8a ที่แสดงภาพก่อนและหลังการดูดกลืน โดยเมื่ออะตอมอยู่ที่สถานะกระตุ้นแล้ว เมื่อโฟตอนถูกดูดกลืนโดยอะตอมอีกครั้งด้วยพลังงานที่เหมาะสมจะทำให้อะตอมที่ถูกกระตุ้นนั้นปล่อยโฟตอนออกมา จากนั้นอะตอมก็จะตกลงสู่ชั้นสถานะพื้นอีกครั้ง ได้ออกมาเป็นโฟตอนสองตัวที่มีทิศทางและเฟสที่ตรงกันแสดงในรูปที่ 2.8b



รูปที่ 2. 8: (a) อะตอมที่สถานะพื้นถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้นเมื่อดูดกลืนโฟตอน (b) เมื่ออะตอมอยู่ที่สถานะกระตุ้น โฟตอนที่มาตกกระทบสามารถทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานได้[43]

หากเริ่มกันที่ 50 อะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น E_2 และ 50 อะตอมที่อยู่ในสถานะพื้น เมื่อมีโฟตอนทั้งสามมาพร้อมกัน โฟตอนแต่ละตัวมีโอกาส 50% ที่จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมที่สถานะกระตุ้น และมีโอกาส 50% ที่จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมในสถานะพื้น ถ้าโฟตอนนั้นถูกดูดกลืนโดยอะตอมที่สถานะกระตุ้น จะเกิดการกระตุ้นให้อะตอมเปล่งแสงออกมา เมื่อเกิดอันตรกิริยากับอะตอมที่อยู่ในสถานะพื้น โฟตอนจะถูกดูดกลืนแทน ดังนั้นทุกครั้งที่โฟตอนถูกสร้างขึ้นจากการปล่อยโดยการกระตุ้น จะมีโฟตอนอีกตัวจะถูกดูดกลืน จากนั้นจำนวนโฟตอนออกจากขวดในรูป "หลัง" ในรูปที่ 2.9b จะเท่ากับจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบในภาพ "ก่อน"

สุดท้ายจะเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมทั้งหมดอยู่ในสถานะกระตุ้น E_1 เมื่อโฟตอนทั้งสามมาพร้อมกัน มีโอกาสเป็นไปได้ที่โฟตอนทั้งหมดจะกระตุ้น จึงได้จำนวนโฟตอนที่ออกมามากกว่าตอนที่เข้าไป



รูปที่ 2. 9: (a) โฟตอนสามตัวถูกดูดกลืน ทำให้อะตอมสามตัวถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น (b) ถ้ามีอะตอมครึ่งหนึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้นในตอนต้น โฟตอนแต่ละตัวจะมีโอกาส 50/50 ที่จะถูกดูดกลืน หรือปลดปล่อยพลังงาน (c) ถ้าอะตอมทั้งหมดอยู่ในสถานะกระตุ้น โฟตอนที่ตกกระทบแต่ละตัวจะเกิดความเป็นไปได้ที่จะปลดปล่อยพลังงานออกมา[43]

นั่นคือภาพอธิบายการขยายแสงโดยการกระตุ้นการปล่อยรังสี (L.A.S.E.R.) แสงถูกขยาย เมื่อกระตุ้นการปล่อยโฟตอนเพิ่มจากเดิมที่มีอยู่แล้ว

โฟตอนเดี่ยว

แหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยว

แหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยวคือแหล่งกำเนิดแสงที่มีการปลดปล่อยแสงออกมาในรูปแบบของอนุภาคเดี่ยวหรือโฟตอนเดี่ยว โดยแหล่งกำเนิดเหล่านี้จะแตกต่างจากแหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์หรือแหล่งกำเนิดแสงจากแลมป์ ซึ่งโฟตอนจากแหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยวในอุดมคติจะสามารถแสดงลักษณะทางควอนตัมได้ [44]

Quantize second-order correlation function

โดยทั่วไปนั้นเมื่อลำแสงที่เข้ามาถูกพิจารณาจากความเข้มของแสง ตัวแบ่งแสง 50:50 (50:50 BS) จะทำหน้าที่ในการแบ่งความเข้มแสงอย่างละครึ่งไปที่แต่ละฝั่งของอุปกรณ์ แต่เมื่อพิจารณาในเชิงปริมาณ เมื่อสมมติว่าให้เป็นโฟตอนแทน โดยเป็นโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่อง จะเกิดโอกาสที่โฟตอนตกกระทบ BS เป็น 50% ในทางใดทางหนึ่งแทนไม่ใช่ทั้งสองฝั่ง ดังนั้นจะไม่เกิดความเชื่อมโยงกันระหว่างตัวตรวจจับทั้งสองตัว ยกเว้นตอนที่มีการใช้ตัวนับโฟตอน ซึ่งรู้กันดีว่าแม้จะมีค่าการหน่วงเวลามากขึ้น แต่จะไม่เกิดเหตุการณ์ที่ $\tau = 0$ เนื่องจากฟังก์ชันสหสัมพันธ์ที่ถูกแสดงออกมาในรูปแบบของความเข้ม จึงต้องมีการเขียนออกมาใหม่ $g^{(2)}(\tau)$ เพื่อให้อยู่ในรูปของการพิจารณาระหว่างอัตราการนับโฟตอน $g^{(2)}(\tau)$ ได้มาจากสมการ

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle n_1(t)n_2(t+\tau) \rangle}{\langle n_1(t) \rangle \langle n_2(t+\tau) \rangle} \quad 2.4$$

เมื่อ $n_i(t)$ คือจำนวนของโฟตอนที่นับได้ที่ตัวตรวจจับ i ที่เวลา t
เมื่ออยู่ในโหมดเดี่ยว การตีความทางควอนตัมที่ $\tau = 0$ จะได้ว่า

$$g^{(2)}(0) = \frac{\langle \hat{a}_1^\dagger(t)\hat{a}_2^\dagger(t+\tau)\hat{a}_2(t+\tau)\hat{a}_1(t) \rangle}{\langle \hat{a}_1^\dagger(t)\hat{a}_1(t) \rangle \langle \hat{a}_2^\dagger(t+\tau)\hat{a}_2(t+\tau) \rangle} = \frac{\langle \hat{n}(\hat{n}-1) \rangle^2}{\langle \hat{n} \rangle} \quad 2.5$$

เมื่อ $\hat{n} = \hat{a}^\dagger \hat{a}$ ตัวจัดการจำนวนและ $\langle \hat{n} \rangle$ หมายถึงค่าการตรวจจับจำนวนโฟตอนที่คาดหวัง คำนิยามของ $\Delta \hat{n} = \hat{n} - \langle \hat{n} \rangle$ สมการที่ 2.6 สามารถเขียนได้ใหม่เป็นฟังก์ชันความแปรปรวนของจำนวนโฟตอน $\langle (\Delta \hat{n})^2 \rangle$

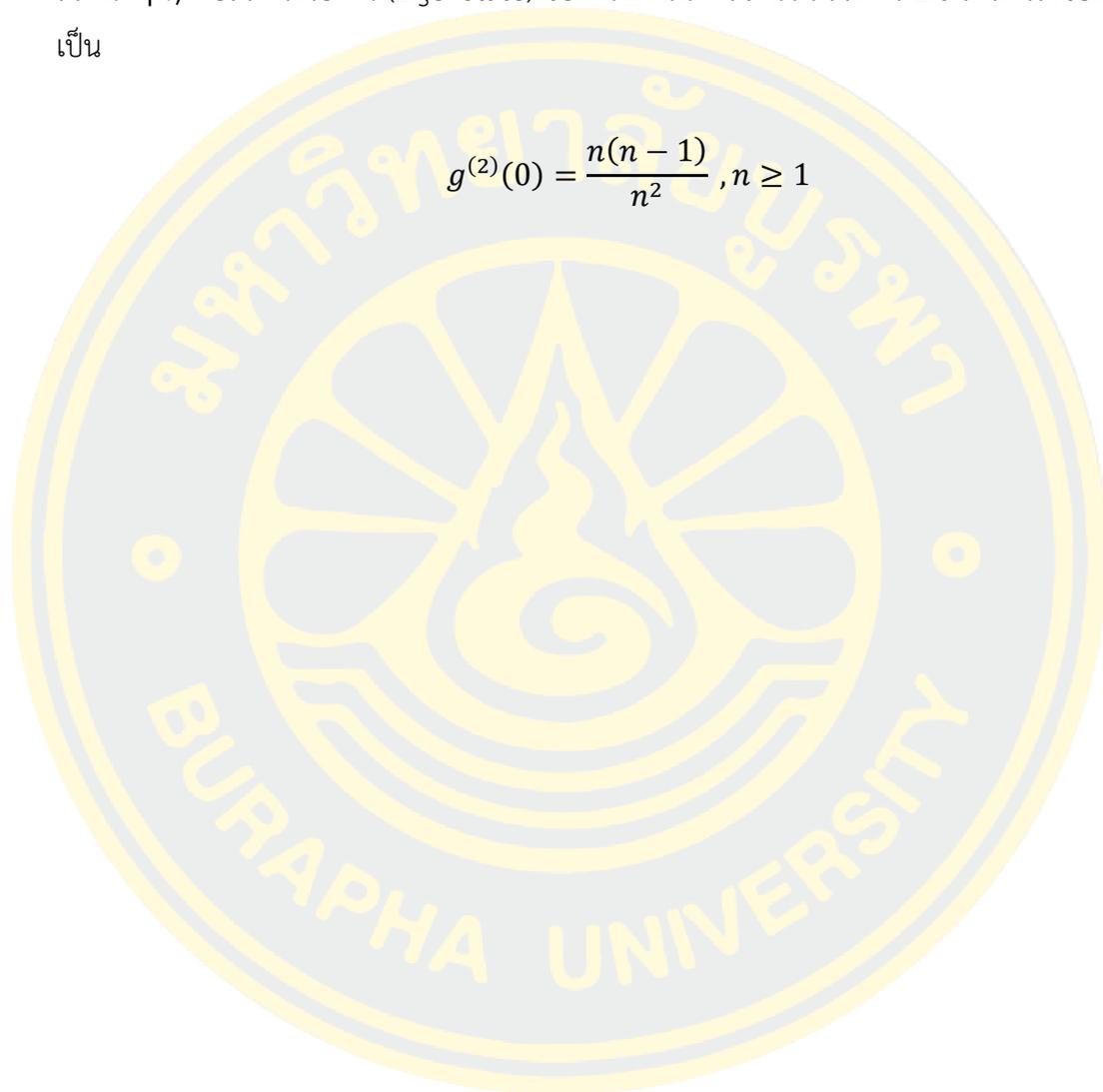
$$g^{(2)}(0) = 1 + \frac{\langle (\Delta \hat{n})^2 \rangle - \langle \hat{n} \rangle}{\langle \hat{n} \rangle^2} \quad 2.6$$

ดังนั้นโหมดเดียวในสถานะโคเฮเรนต์ $\langle (\Delta\hat{n})^2 \rangle = \hbar$ สำหรับการกระจายจำนวนโฟตอนแบบปัวซอง จะได้ $g^{(2)}(0) = 1$ โดยสิ่งนี้ถูกทำนายด้วยทฤษฎีคลาสสิกของแสง [45]

ลำแสงที่ไม่เป็นคลาสสิกที่มี n โฟตอนรู้จักกันในชื่อ สถานะฟอกค์ (Fock state) เมื่อชั้นสถานะ $|n\rangle$ คือสถานะไอเกน (Eigenstate) ของตัวดำเนินการจำนวน สมการ 2.6 สามารถเขียนได้เป็น

$$g^{(2)}(0) = \frac{n(n-1)}{n^2}, n \geq 1$$

2.7



วอร์เท็กซ์ของแสง

ลำวอร์เท็กซ์ (Vortex beam :VBs)

วอร์เท็กซ์ของแสง หรือที่รู้จักกันในชื่อเฟส เอกฐาน(Phase singularity) คือ เอกฐานของแสงรูปแบบหนึ่งซึ่งมีหน้าคลื่นเป็นเฟสเกลียวรอบจุดเอกฐาน โดยเฟสที่เป็นเกลียวของลำแสงวอร์เท็กซ์จะหมุนรอบแกนของลำแสง ทำให้หน้าคลื่นของแสงบิดเหมือนเกลียวเมื่อแผ่ออกไป โดยมีประจุทอพอโลยีถูกใช้เพื่อเป็นสิ่งที่กำหนดจำนวนรอบการบิดของแสงในหนึ่งความยาวคลื่น ซึ่งจำนวนของประจุทอพอโลยีนั้นสามารถเป็นค่าบวกหรือค่าลบก็ได้ ขึ้นอยู่กับทิศทางในการบิดของแสง เมื่อจำนวนการบิดเกลียวมากจะแสดงถึงความเร็วของแสงในการบิดรอบแกน โดยลำแสงวอร์เท็กซ์ที่มีประจุทอพอโลยีกล่าวว่ามีโมเมนตัมเชิงมุมของวงโคจรภายนอก (Orbital Angular Momentum: OAM) เท่ากับ $l\hbar$ [12] เมื่อ $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ สอดคล้องกับประจุโทโพโลยี

VBs มีคุณสมบัติการเลี้ยวเบนที่เป็นเอกลักษณ์ โดรนรูปแบบการเลี้ยวเบนของช่องรับแสงจะสัมพันธ์กับ OAM จริง ตั้งแต่ Hickmann และคณะเปิดตัวในปี 2010 รูปแบบแปลกใหม่รูปแบบต่างๆ ในการเลี้ยวเบนของ VBs ตั้งแต่การเลี้ยวเบนในสนามไกลของรูปรับแสงสามเหลี่ยมของ VBs ซึ่งถูกใช้เป็นวิธีในการตรวจจับและวัด OAM ของวอร์เท็กซ์เฟมโตวินาที (Femtosecond) ที่ไม่ใช้จำนวนเต็ม และ VBs ทรงรี มีการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนในสนามไกลผ่าน สลิต รูรับแสงสี่เหลี่ยม รูรับแสงรูปโดมอน รูรับแสงวงกลมและอื่นๆ โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบพิเศษเหล่านี้คือสิ่งที่ช่วยในการตรวจวัดสถานะ OAM วอร์เท็กซ์ได้ [46]

การเลี้ยวเบนของวอร์เท็กซ์เชิงแสงในย่านสนามใกล้

สำหรับการตรวจวัดสถานะ OAM ด้วยปรากฏการณ์ทาลบอดจะสามารถอธิบายในรูปแบบการแทรกสอดในสนามใกล้ของ OV ผ่านเกรตติงเลี้ยวเบนสามารถอธิบายได้ตามทฤษฎีดังนี้

1. ฟังก์ชันคลื่นที่เข้ามาที่ระนาบ x_1, y_1 ที่ $z_1 = 0$ สำหรับ OAM สถานะออร์บิทัล $\pm l$ จะได้

$$V_{\pm l}(x_1, y_1, z_1 = 0) = (x_1 \pm iy_1)^{|l|} \times \exp\left\{\left(-\frac{1}{w^2}\right)(x_1^2 + y_1^2)\right\} \quad 2.8$$

เมื่อ w แสดงถึงรัศมีเกาส์เซียนที่สอดคล้องกับขนาดของวอร์เท็กซ์

2. ฟังก์ชันการส่งผ่านเกรตติงตามแนวแกน x_j คือ

$$G_j(x_j) = \sum_{n_j} A_{n_j} \exp\{in_j k_d x_j\} \quad 2.9$$

เมื่อ $j = 1, 2, k_d = \frac{2\pi}{d}$ โดยที่ d คือคาบของเกรตติง

3. ปริพันธ์เฟสเนล คือ

$$f_{n_1, n_2}(x, y, L_1, L_2) = \left(x + n_1 d \frac{(L_1 + L_2)}{L_T} + n_2 d \frac{L_2}{L_T} \right) \pm iy \quad 2.10$$

เมื่อ $L_1 = L_T =$ ระยะจากเกรตติงที่ 1 ถึงเกรตติงที่ 2 และ L_2 คือระยะจากเกรตติงที่ 2 ถึงตัวตรวจวัด

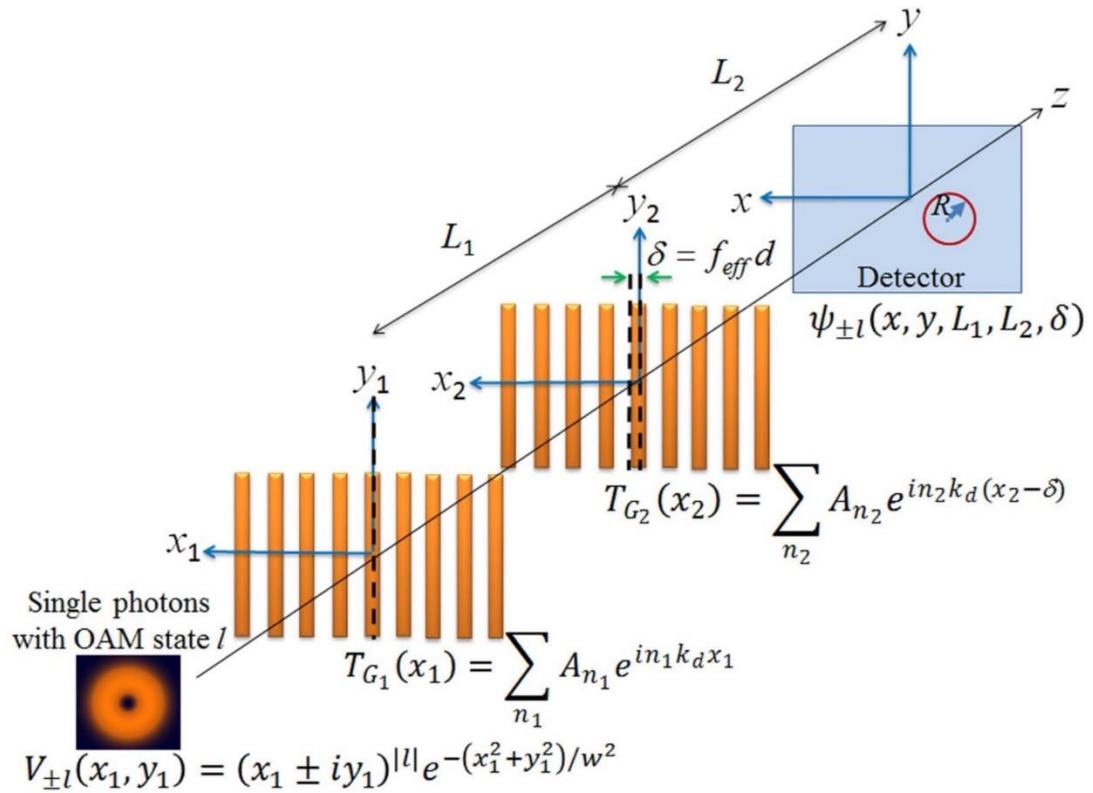
4. ฟังก์ชันคลื่นที่ได้

$$\begin{aligned} \psi_{\pm l}(x, y, L_1, L_2, \delta) &= C_l(L_1, L_2) \times \sum_{n_1, n_2} A_{n_1} A_{n_2} f_{n_1, n_2}^{|\pm l|}(x, y, L_1, L_2) \\ &\times \exp \left\{ -\beta(L_1, L_2) \times |f_{n_1, n_2}(x, y, L_1, L_2)|^2 \right. \\ &\left. - i g_{n_1, n_2}(x, L_1, L_2, \delta) \right\}, \end{aligned}$$

$$\beta(L_1, L_2) = \frac{k(2L_1 + ikw^2)}{2L_2(kw^2 - 2i(L_1 + L_2))}$$

$$g_{n_1, n_2}(x) = n_1 k_d x \frac{L_1}{L_2} + n_2 k_d \delta + \frac{n_1^2 \pi L_1}{L_T} \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) + 2\pi n_1, n_2 \frac{L_1}{L_T} \quad 2.11$$

เมื่อ เลขคลื่น k คือ $2\pi/\lambda$, สัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ $A_{n_j} = \sin(n_j \pi f) / (n_j \pi)$ สำหรับฟังก์ชันการส่งผ่าน[47]

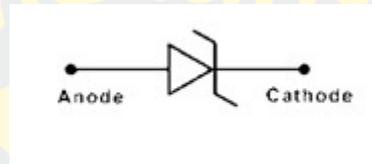


รูปที่ 2. 10: ไดอะแกรมทฤษฎีสำหรับการส่งผ่านจากด้านซ้ายไปด้านขวา เมื่อคลื่นเข้ามาพร้อมกับสถานะ OAM l ในรูปแบบของฟังก์ชันคลื่น $V_{\pm l}$ เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง G_1 และ G_2 เกรตติงเหล่านี้แสดงโดยใช้ฟังก์ชันการส่งผ่าน $T_{G_{1,2}}$ ด้วยการเลื่อนระยะเกรตติง δ ผลจากรีรอยการแทรกสอดทาลบอดตุกสังเกตุได้บนฉากที่ระนาบ xy [47]

อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด (Avalanche Photodiode:APD)

APD คืออะไร

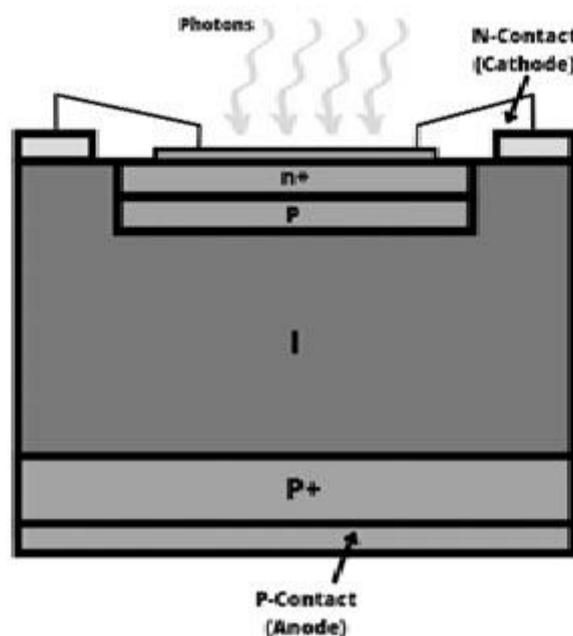
APD คือไดโอดที่ใช้วิธีการถล่มหลายเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่พิเศษเมื่อเทียบกับไดโอดอื่นๆ เรียกว่า อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด โดยไดโอดเหล่านี้จะถูกใช้เพื่อเปลี่ยนสัญญาณจากแสงเป็นไฟฟ้า ไดโอดเหล่านี้สามารถทำงานได้โดยไบแอสแบบย้อนกลับสูง สัญลักษณ์ของ APD จะคล้ายกับซีเนอร์ไดโอด[48]



รูปที่ 2.11: สัญลักษณ์ของ APD[48]

การสร้าง APD

การสร้าง PIN โฟโตไดโอดและ APD มีจุดที่คล้ายกันนั่นคือไดโอดเหล่านี้จะประกอบไปด้วย โชนที่ถูกโดปสูง (Heavily doped) คือ P+ และ N+ และโชนที่ถูกโดปต่ำ (Lightly doped) คือ I และ P [48]



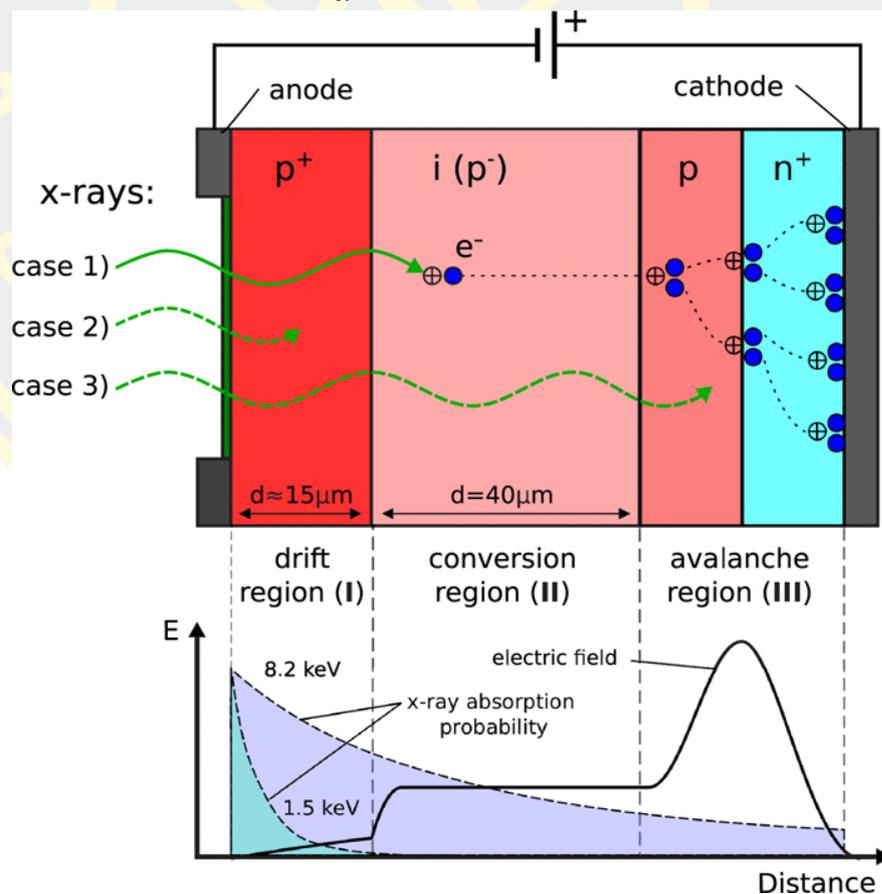
รูปที่ 2.12: โครงสร้างของ APD[48]

ภายในส่วนของบริเวณปลอดพาหะมีขนาดบางเมื่อเทียบกับ PIN ไดโอด ในที่นี้ p^+ จะทำหน้าที่เหมือนแอนโนด และ n^+ จะทำหน้าที่เหมือนแคโทด

หลักการทำงาน

อะวาแลนช์เบรกดาวน์ (Avalanche breakdown) ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อโฟโตไดโอดอยู่ภายใต้แรงดันย้อนกลับสูงสุด โดยแรงดันไฟฟ้านี้จะสร้างสนามไฟฟ้าให้มากเกินกว่าชั้นปลอดพาหะ เมื่อแสงตกกระทบทะลุผ่านช่วง p^+ แสงจะถูกดูดซับบริเวณ p ที่มีความต้านทานสูง จากนั้นคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะถูกสร้างขึ้นมา

หลังจากนั้นประจุจะเคลื่อนที่ไปทางบริเวณ pn^+ ซึ่งเป็นที่มีสนามไฟฟ้าสูง เมื่อความเร็วของการเคลื่อนที่สูง ประจุที่เคลื่อนตัวไปจะไปชนกับอะตอมอื่นอีกและเกิดคู่อิเล็กตรอนใหม่ขึ้นมา ซึ่งเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นซ้ำๆนี้ก่อให้เกิดปรากฏการณ์อะวาแลนช์ [49]



รูปที่ 2.13: หลักการทำงานของ APD[49]

ลักษณะของ APD

อะวาแลนซ์โฟโตไดโอดเป็นไดโอดที่มีความไวสูงและมีความเร็วที่สูง ซึ่งมีหลักการนั้นคือการจ่ายแรงดันย้อนกลับเมื่อเปรียบเทียบกับ PIN ไดโอด ไดโอดเหล่านี้จะใช้ในการวัดแสงที่มีความต่ำมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานต่างๆที่ต้องการความไวสูง เช่นการวัดระยะห่างของแสง หรือการสื่อสารด้วยแสงสำหรับระยะไกล [50]

ข้อดีและข้อเสียของ APD

ข้อดี

- เป็นประโยชน์เมื่อต้องการใช้ในการตรวจจับแสงที่มีความเข้มต่ำ
- ความไวสูงเมื่อเทียบกับโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆ
- ตอบสนองเร็ว
- หนึ่งโฟตอนสามารถสร้างประจุได้อีกหลายตัว ซึ่งหมายความว่า จะเกิดการขยายของกระแสภายใน

ข้อเสีย

- ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูง
- มีสัญญาณรบกวนสูง
- เอาท์พุทไม่เชิงเส้น

สัญญาณมืด (Dark count)

สิ่งนี้คืออัตราเฉลี่ยของการนับที่บันทึกไว้ในกรณีที่ไม่มีแสงใดๆมาตกกระทบ และมีกำหนดอัตราการนับขั้นต่ำที่สัญญาณซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากโฟตอน โดยเหตุการณ์การตรวจจับที่ผิดพลาดนั้นส่วนใหญ่เกิดจากความร้อน ดังนั้นจึงสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ APD ที่มีการระบายความร้อน [51]

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จุดมุ่งหมายของการวิจัยนี้เพื่อให้สามารถตรวจวัดแยกแยะวอร์เท็กซ์ของแสงโพตอนเดี่ยวโดยใช้รีรอยการแทรกสอดของทาลบอตในพิสัยสนามใกล้แบบสองเกรตติง ทำให้ไม่ต้องใช้กล้องสำหรับโพตอนเดี่ยวที่มีราคาสูง โดยมีการใช้อุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. Diode Laser (LD, L785H1, Thorlabs)
2. Collimating lens (CL, LB1092B-ML, Thorlabs)
3. Linear polarizer (LP, LPVIS100-MP2, Thorlabs)
4. Half-wave plate (HWP, WPH10M-780, Thorlabs)
5. Polarization beam splitter (PBS, PBS202, Thorlabs)
6. Quarter-wave plate (QWP, WPQ10M-780, Thorlabs) x3
7. Vortex Half wave retarder (VHWR, WPV10L-780, Thorlabs) x2
8. Grating (G, d=200 μ m, chromium on glass, Edmund Optics Inc.) x2
9. Beam splitter (BS, BS014, Thorlabs)
10. Avalanche photodiode (APD)
11. Translation Stage (TS1, GCM-122101M, Daheng)
12. Translation Stage (TS2, PT1/M, Thorlabs)
13. Translation Stage (TS3, MTS25/M-Z8, Thorlabs)
14. T-Cube DC Servo Motor Controller (TDC001, Thorlabs)
15. Fiber Optics (F, FC/FC MM.Patch cord 1 m, OM4, 50/125) x2

วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโพตอนเดี่ยวที่ถูกทำให้เป็นลำวอร์เท็กซ์ก่อนเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง ทั้งรูปแบบของรีรอยการแทรกสอดเมื่อโพตอนเดี่ยวผ่านเกรตติง และความสามารถในการตรวจจับวอร์เท็กซ์ของแสง ซึ่งในส่วนของการทดลองนั้นประกอบไปด้วยส่วนของภาคส่งและส่วนของภาครับ อีกทั้งการสร้างภาพรูปแบบการแทรกสอดของโพตอนเดี่ยวเมื่อผ่านเกรตติงโดยการวาดกราฟจากค่าสัญญาณที่ได้จากการทดลอง

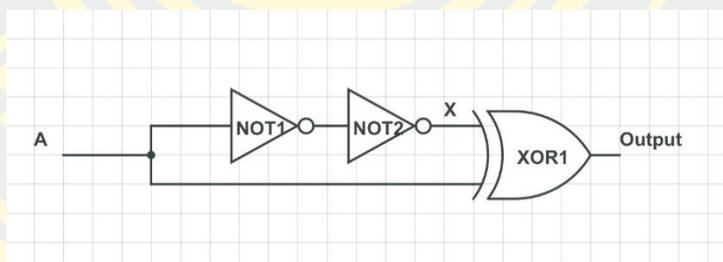
ภาคส่ง

ในส่วนของภาคส่งคือส่วนที่ประกอบไปด้วยวงจรรีเลย์ทรอนิกส์และอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อสร้างลำแสงที่เป็นพัลส์แคบเพื่อสร้างฐานเวลาก่อนทำการลดทอนแสงด้วยอุปกรณ์ทัศนศาสตร์เพื่อให้เกิดเป็นแหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยว

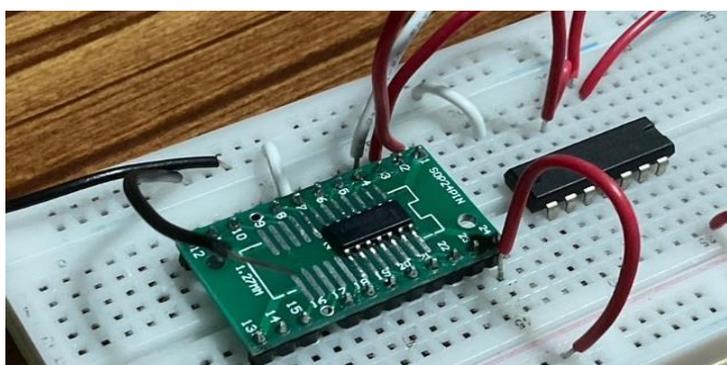
วงจรรีเลย์ทรอนิกส์

วงจรรีเลย์ทรอนิกส์แบบพัลส์แคบ

สร้างสัญญาณแบบพัลส์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function generator) ทำการกำหนดความถี่ของสัญญาณอยู่ที่ 500 KHz เข้าสู่วงจรรีเลย์ทรอนิกส์แบบพัลส์แคบ โดยรีเลย์ทรอนิกส์นั้นมีความยาวคลื่นอยู่ที่ 785 nm หลักการที่ใช้คือการใช้หลัก ลอจิกเกต (Logic gate) นั่นคือใช้ไอซีอินเวอร์เตอร์ (74HC4N) เพื่อทำการหน่วงสัญญาณที่มาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณก่อนที่จะทำการเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณที่มาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณและสัญญาณที่ถูกหน่วงด้วยไอซีเอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต (VHC86) เมื่อสัญญาณทั้งสองถูกเทียบกันแล้วนั้น สัญญาณที่ได้ออกมาจะมีความกว้างพัลส์อยู่ที่ 10 ns และมีความถี่ของสัญญาณอยู่ที่ 1MHz จากนั้นนำสัญญาณนี้ขับไดโอดเลเซอร์ต่อไป แผนภาพวงจรแสดงดังรูป 3.1 โดยสัญญาณ A แสดงถึงสัญญาณที่มาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณและสัญญาณ X คือสัญญาณหลังจากถูกหน่วงด้วยไอซีอินเวอร์เตอร์สองตัว



รูปที่3.1: ไดอะแกรมแสดงวงจรรีเลย์ทรอนิกส์แบบพัลส์แคบ

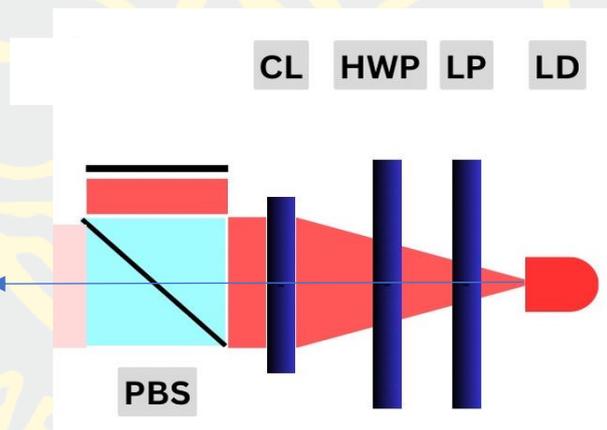


รูปที่3.2: วงจรรีเลย์ทรอนิกส์แบบพัลส์แคบ

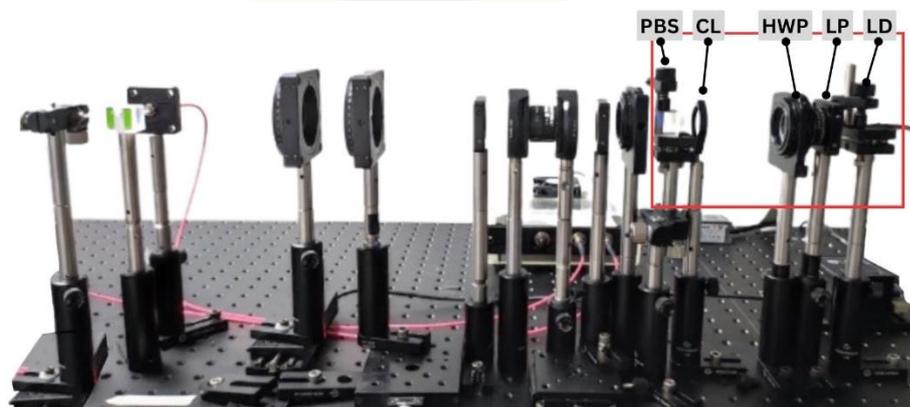
อุปกรณ์ทัศนศาสตร์

อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในภาคส่งถูกใช้เพื่อเป็นส่วนในการลดทอนแสงจากไดโอดเลเซอร์ให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อให้เกิดเป็นแหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยวที่ใช้ในงานวิจัย

1. เริ่มจากการใช้ฟิลเตอร์กรองโพลาไรซ์เชิงแสงเพื่อเลือกโพลาไรซ์ที่ต้องการ (ในส่วนนี้จะเป็นการกำหนดเครื่องหมายของลำออร์เท็กซ์) ให้เหลือเพียงโพลาไรซ์เดียว
2. หลังจากเลือกโพลาไรซ์ที่ต้องการให้เหลือเพียงโพลาไรซ์เดียวแล้วนั้น ต่อไปเป็นการใช้แผ่นฮาล์ฟเวฟ เพื่อเลือกโพลาไรซ์ที่แสงผ่านไปได้น้อยที่สุด และสะท้อนออกให้ได้มากที่สุด (ขั้นตอนลดทอนแสง)
3. จากนั้นใช้เลนส์เพื่อทำให้แสงจากไดโอดเลเซอร์เป็นลำขนานและทำการขยายแสงจากไดโอดเลเซอร์ เพื่อให้แสงที่ได้ครอบคลุมพื้นที่ด้านหน้าของเกรตติง
4. ต่อมาเป็นส่วนของตัวแยกลำแสงโพลาไรซ์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานควบคู่กับแผ่นฮาล์ฟเวฟนั่นเอง



รูปที่3.3: ไดอะแกรมแสดงอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในส่วนของภาคส่งที่มีการลดทอนแสงประกอบไปด้วย ไดโอดเลเซอร์ (LD), ฟิลเตอร์กรองโพลาไรซ์เชิงแสง (LP), แผ่นฮาล์ฟเวฟ (HWP), เลนส์ (CL), และ ผลึกแยกลำแสงโพลาไรซ์ (PBS)



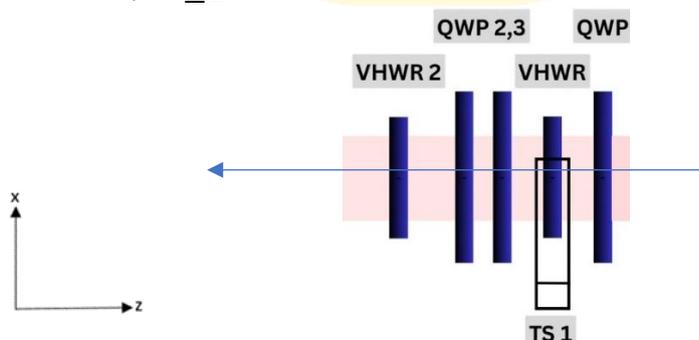
รูปที่3.4: อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในส่วนของภาคส่งที่มีการลดทอนแสง

การสร้างลำแสงวอร์เท็กซ์

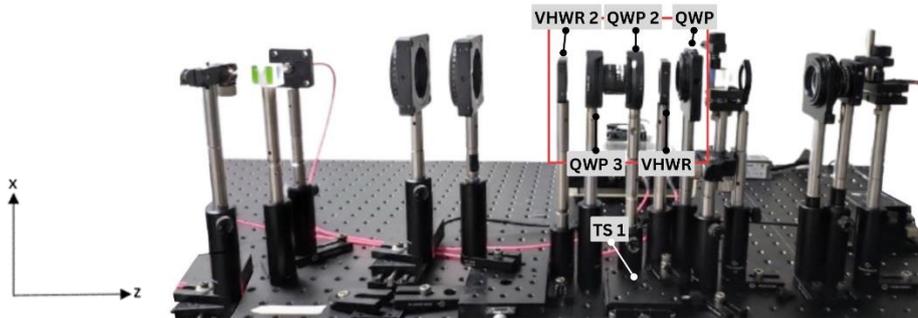
ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของการสร้างลำวอร์เท็กซ์เพื่อศึกษารีวิวการแทรกสอดของทาลบอตด้วยวอร์เท็กซ์ของแสงโพตอนเดี่ยว

อุปกรณ์ทัศนศาสตร์

1. หลังจากที่ได้โพตอนเดี่ยวจากส่วนของภาคส่งแล้ว ต่อไปคือการทำให้แสงมีลักษณะเป็นโพลาไรซ์แบบวงกลมด้วยการใช้แผ่นควอเตอร์เวฟ โดยองศาที่ใช้นั้นคือ 45 องศาเมื่อเทียบกับฟิลเตอร์กรองโพลาไรซ์เชิงแสง โดยโพลาไรซ์แบบวงกลมที่หมุนทางขวาจะทำให้สถานะวอร์เท็กซ์ของแสงที่ได้คือ $l = +1$ และโพลาไรซ์แบบวงกลมที่หมุนทางซ้ายจะทำให้สถานะวอร์เท็กซ์ของแสงที่ได้คือ $l = -1$
2. เมื่อแสงเป็นโพลาไรซ์แบบวงกลมแล้วจากนั้นใช้แผ่นสร้างวอร์เท็กซ์ ลำแสงที่ได้จะเกิดเป็นลำวอร์เท็กซ์ตามที่ต้องการ โดยสถานะวอร์เท็กซ์ของแสงที่ได้คือ $l = \pm 1$ ขึ้นกับโพลาไรซ์แบบวงกลม
3. หลังจากได้วอร์เท็กซ์ของแสงที่สถานะ $l = \pm 1$ แล้ว โพลาไรซ์ที่ได้จะกลับไปเป็นทิศทางตรงกันข้ามกับตอนเริ่มต้น จึงต้องใช้แผ่นควอเตอร์เวฟ 2 แผ่น เพื่อกลับโพลาไรซ์ให้กลับมาอยู่ในทางเดิมก่อนที่จะใส่แผ่นสร้างวอร์เท็กซ์อีกครั้ง
4. เมื่อโพลาไรซ์กลับมาอยู่ในทิศทางเดิมแล้ว ทำการใส่แผ่นวอร์เท็กซ์ตัวที่ 2 เข้าไปเพื่อให้ได้สถานะวอร์เท็กซ์ของแสง $l = \pm 2$
5. เพื่อให้การทดลองสามารถกำหนดสถานะวอร์เท็กซ์ของแสงได้ทั้ง $l = \pm 1$ และ $l = \pm 2$ จึงต้องทำการติดตั้งสแตจเลื่อน (TS1) ในแนวแกน x ที่แผ่นสร้างวอร์เท็กซ์ตัวที่ 1 โดยเมื่อเลื่อนสแตจตามแนวแกน x ให้แผ่นสร้างวอร์เท็กซ์ตัวที่ 1 มีตำแหน่งตรงกับ แผ่นวอร์เท็กซ์ตัวที่ 2 จะทำให้เกิดสถานะ $l = \pm 2$ และเมื่อเลื่อนวอร์เท็กซ์ตัวที่ 1 ออกมา ทำให้เหลือเพียงแผ่นวอร์เท็กซ์ตัวที่ 2 เพียงตัวเดียว จึงเกิดสถานะ $l = \pm 1$



รูปที่ 3.5: ไดอะแกรมแสดงส่วนของการสร้างลำวอร์เท็กซ์ที่ประกอบไปด้วย แผ่นควอเตอร์เวฟ (QWP) และแผ่นสร้างวอร์เท็กซ์ (VHWR)

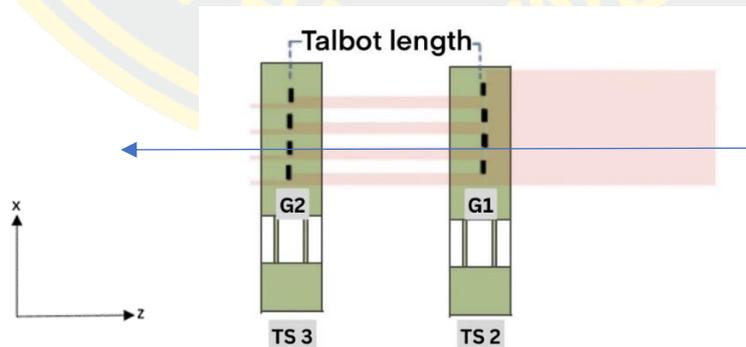


รูปที่ 3.6: อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในส่วนของสร้างลำวอร์เท็กซ์

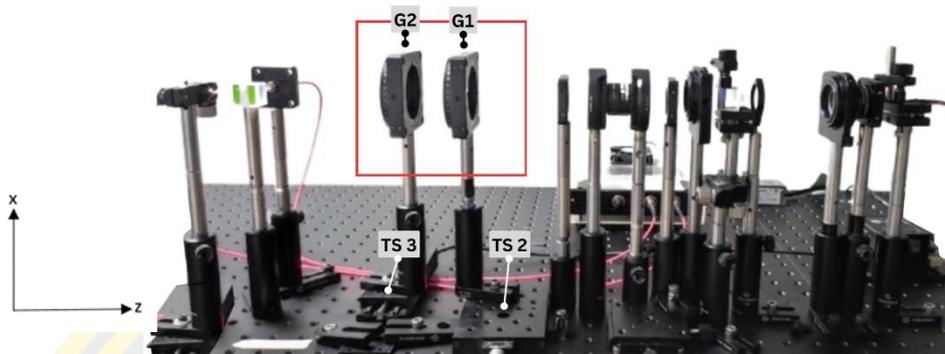
จากรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเลื่อนสแตจ (TS1) ในแนวขวาง สามารถทำให้กำหนดสถานะวอร์เท็กซ์ของแสงที่ต้องการทดลองได้ โดยเมื่อเลื่อนเข้า จะได้สถานะวอร์เท็กซ์ของแสง $l = \pm 2$ และเมื่อเลื่อนออก จะทำให้ได้สถานะวอร์เท็กซ์ของแสงที่ $l = \pm 1$ นั่นเอง

การตรวจจับและระบุวอร์เท็กซ์ของโฟตอนเดี่ยว

เมื่อทำการลดทอนแสงจนได้เป็นแหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยว ก่อนที่จะทำให้เป็นลำวอร์เท็กซ์ แล้ว จากนั้นจะเป็นส่วนขององค์ประกอบในการเลี้ยวเบนซึ่งประกอบไปด้วยเกรตติงสองตัว G1 และ G2 ที่มีคาบเท่ากัน $d = 200 \mu\text{m}$ ซึ่งเกรตติงตัวที่ 1 (G1) คือเกรตติงเลี้ยวเบน และเกรตติงตัวที่ 2 (G2) จะทำหน้าที่เป็นหน้าฉาก โดยเกรตติงตัวที่ 1 (G1) สามารถเลื่อนตามแนวขวางได้ด้วยสแตจเลื่อน (TS2) เพื่อตรวจสอบการเลื่อมกันระหว่างสองเกรตติง วิธีนี้ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับวอร์เท็กซ์ของแสงได้ [34, 47] และเกรตติงตัวที่ 2 (G2) ที่เป็นเหมือนหน้าฉากสามารถเลื่อนได้โดยใช้สแตจเลื่อน (TS3) เพื่อตรวจสอบรูปแบบของร็วรอยการแทรกสอดทาลบอดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.7: ไดอะแกรมแสดงการจัดวางเกรตติงสองตัว G1 และ G2 โดยเกรตติงตัวที่ 1 (G1) ถูกเลื่อนตามแนวขวางด้วยสแตจเลื่อน (TS2) เพื่อตรวจสอบการเลื่อมกันระหว่างสองเกรตติง และเกรตติงตัวที่ 2 ที่ทำหน้าที่เป็นหน้าฉากถูกจัดวางบนสแตจเลื่อน (TS3) เพื่อตรวจสอบรูปแบบของร็วรอยการแทรกสอดทาลบอด



รูปที่ 3.8: อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในส่วนการจัดวางเกรตติงสองตัวที่มีคาบเท่ากันถูกวางเหลื่อมกัน

ภาครับ

ในส่วนของภาครับนั้นมีการใช้ตัวแยกลำแสงแบ่งแสงออกเป็นสองทาง (BS) เพื่อเทียบสัญญาณที่ได้รับในเวลาเดียวกัน ใช้ตรวจสอบความเป็นโพตอนเดี่ยวของสัญญาณที่ได้รับ โดยหลังจากผ่านตัวแยกลำแสงแล้ว มีการใช้ไฟเบอร์ออปติกเพื่อรับสัญญาณโพตอนเดี่ยวที่ได้ (F1 และ F2) ก่อนส่งสัญญาณไปยัง APD เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งวิธีในการบันทึกผลการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วน

รูปแบบการแทรกสอดของโพตอนเดี่ยว

ในส่วนนี้คือการสร้างรูปแบบการแทรกสอดของโพตอนเดี่ยวหลังผ่านเกรตติง โดยมีเกรตติงตัวที่สอง (G2) ทำหน้าที่เป็นหน้าฉากหน้าไฟเบอร์ออปติก ทำการเลื่อนสแตจ (TS3) ตามแนวแกน x ที่ละ 0.005 mm เป็นจำนวน 80 ครั้ง โดยมีระยะอยู่ที่ 400 μm โดยทุกครั้งที่เลื่อนจะทำการเก็บค่าสัญญาณจำนวนโพตอนเดี่ยวที่นับได้ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวาดกราฟระหว่างสัญญาณจำนวนโพตอนเดี่ยวที่นับได้และระยะที่เลื่อนตามแนวขวาง

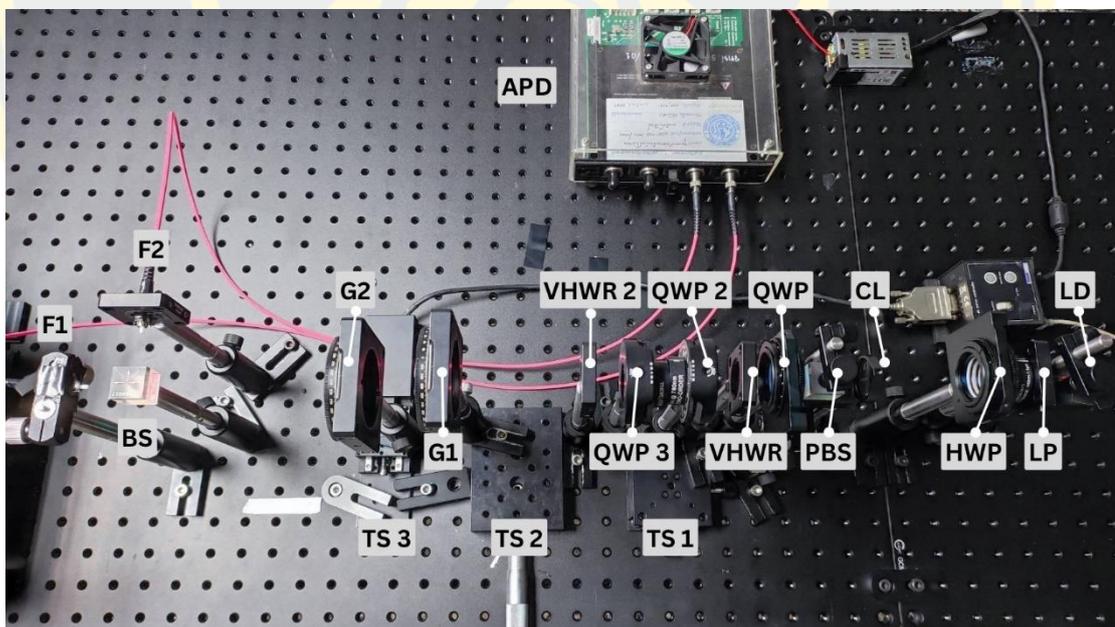
รื้อรอยการแทรกสอดของทาลบอตเพื่อตรวจจ็วอร์เท็กซ์ของแสงด้วยโพตอนเดี่ยว

ในส่วนนี้คือการศึกษารื้อรอยการแทรกสอดของทาลบอตเพื่อตรวจจ็วอร์เท็กซ์ของแสงด้วยโพตอนเดี่ยว ในการทดลองนั้นจะทำการเปลี่ยนกำหนดโพลาริซเพื่อเปลี่ยนสถานะของวอร์เท็กซ์ของแสงตั้งแต่ $l = -2, l = +2, l = -1$ และ $l = +1$ ก่อนที่จะทำการเก็บค่าสัญญาณโพตอนเดี่ยวที่ได้ในแต่ละสถานะของวอร์เท็กซ์ของแสงที่เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 3.9 แสดงภาพภาครับของการทดลอง โดยไฟเบอร์ออปติกตัวที่ 1 (ทางตรง) ถูกติดตั้งบนสแตงเลื่อนตามแนวแกน x เพื่อหาตำแหน่งที่รอยบากจากรีรอยการแทรกสอดของทาลบอต โดยวอร์เท็กซ์ของแสงมาตกพอดี จากนั้นรับสัญญาณที่ได้ก่อนส่งไปยังเครื่อง APD



รูปที่ 3.9: อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ในส่วนของภาครับประกอบไปด้วยตัวแยกลำแสง (BS), ไฟเบอร์ออปติกตัวที่ 1 และ 2 (F1 และ F2)



รูปที่ 3.10: อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด

บทที่ 4

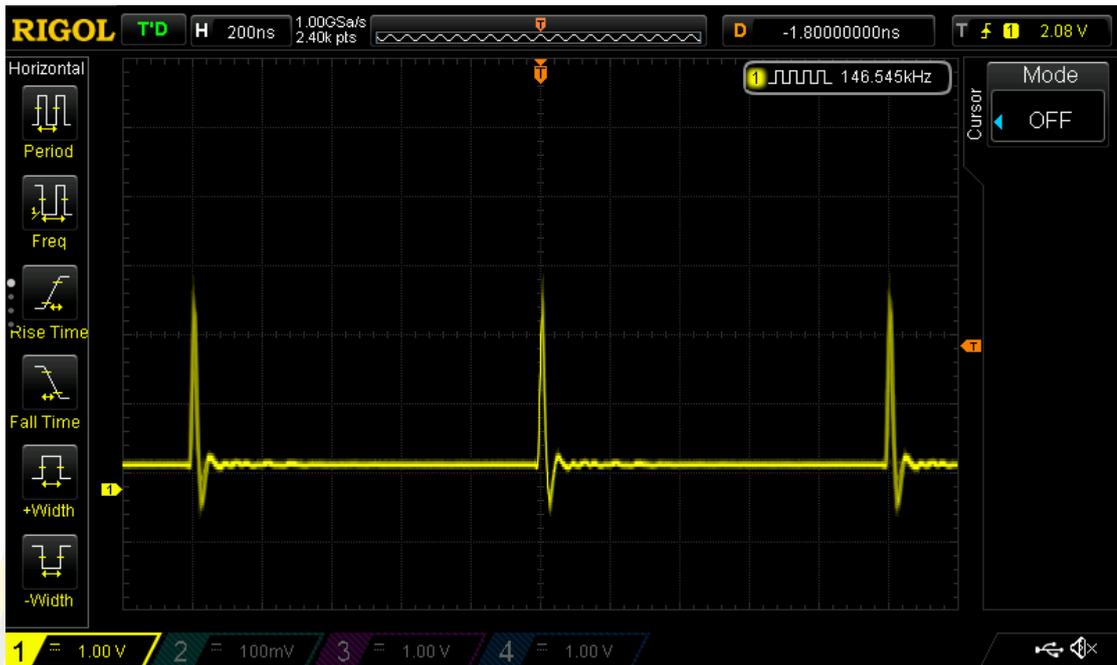
ผลการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้สามารถตรวจวัดแยกแยะแอมพลิจูดของแสงโพตอนเดี่ยว โดยใช้รีจอยการแทรกสอดของทาลบอตในพิสัยสนามใกล้แบบสองเกรตติง ทำให้ไม่ต้องใช้กล้องสำหรับโพตอนเดี่ยวที่มีราคาสูง ซึ่งผลการดำเนินการนั้นที่ได้นั้นถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ประกอบไปด้วยส่วนแรกนั้นคือส่วนของภาคส่ง และส่วนที่สองคือส่วนของภาครับ โดยในส่วนของภาครับนั้นจะมีการแสดงผลการทดลองที่แสดงในเห็นรูปแบบการแทรกสอด และรูปแบบสัญญาณโพตอนเดี่ยวที่ได้จากเครื่อง APD

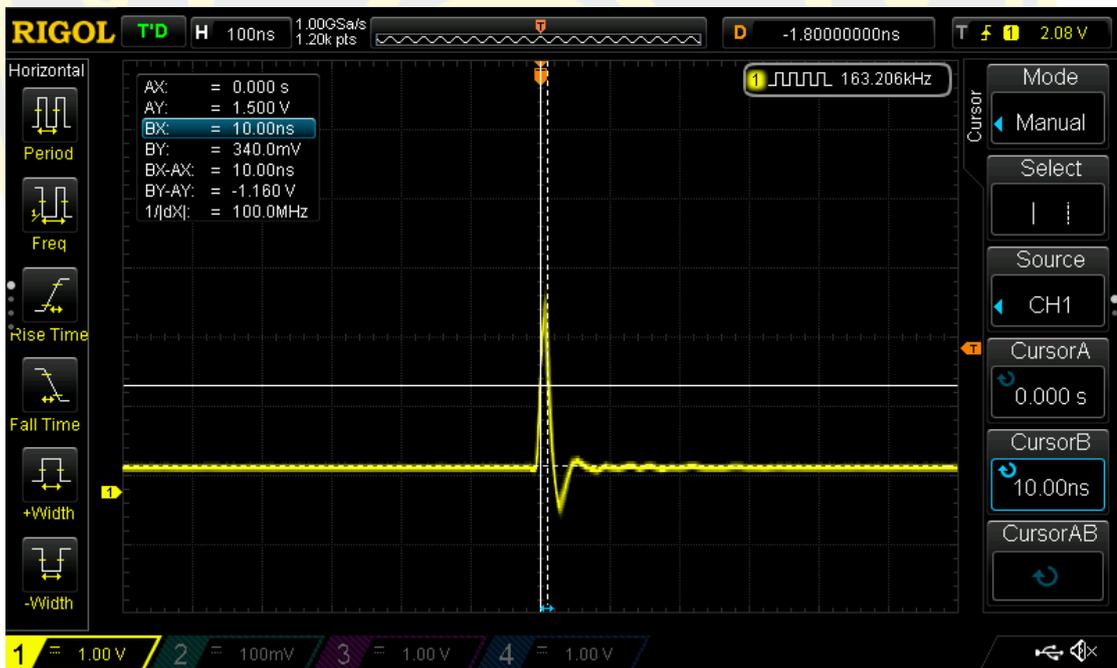
4.1 ผลการดำเนินงานวิจัยในส่วนของภาคส่ง

ในส่วนแรกที่เป็นผลการทดลองจากส่วนของภาคส่งนั้น มีการออกแบบวงจรพัลส์แคบเพื่อสร้างฐานเวลาก่อนที่จะทำการลดทอนแสงที่ได้เพื่อให้เกิดเป็นแหล่งกำเนิดโพตอนเดี่ยว มีการสร้างสัญญาณแบบพัลส์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function generator) ทำการกำหนดความถี่ของสัญญาณอยู่ที่ 500 kHz เข้าสู่วงไดโอดเลเซอร์แบบพัลส์แคบ โดยไดโอดเลเซอร์นั้นมีความยาวคลื่นอยู่ที่ 785 nm และเพื่อให้ได้ขนาดพัลส์ที่แคบนั้น มีหลักการที่ใช้คือหลัก ลอจิกเกต (Logic gate) นั่นคือการใช้ไอซินนอทเกตเพื่อทำการหน่วงสัญญาณที่มาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณก่อนที่จะทำการเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณที่มาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณและสัญญาณที่ถูกหน่วง เมื่อสัญญาณทั้งสองถูกเทียบกันแล้วนั้น สัญญาณที่ได้ออกมาจะมีความกว้างพัลส์อยู่ที่ 10 ns และมีความถี่ของสัญญาณอยู่ที่ 1MHz ตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยรูปแสดงสัญญาณที่ได้จากวงจรพัลส์แคบ โดยสัญญาณที่ได้ นั้นมีความถี่อยู่ที่ 1 MHz และขนาดของแอมพลิจูด (Amplitude) ของสัญญาณที่ได้คือ 2.8 V และรูปที่ 4.2 นั้นคือรูปที่แสดงขนาดของ FWHM (Full Width at Half Maximum) ของสัญญาณที่ได้ นั้นคือมีขนาดอยู่ที่ 10 ns

เมื่อได้ขนาดของสัญญาณพัลส์แคบตามที่ต้องการแล้ว ส่วนต่อไปจึงเป็นส่วนของการนำเข้าสู่สัญญาณต่อกับเครื่องขับสัญญาณเลเซอร์ไดโอด (Model 501B LASER Diode Driver) ก่อนทำการต่อเข้ากับเลเซอร์ไดโอดที่ถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการทดลองก่อนที่จะทำการลดทอนแสงโดยการใช้อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ให้ได้ลำโพตอนเดี่ยวตามที่ต้องการเพื่อทดลองในขั้นตอนนี้ต่อไป



รูปที่ 4.1: สัญญาณที่ได้เมื่อผ่านวงจรพัลส์แคบ มีความถี่ของสัญญาณ 1MHz และแอมพลิจูด 2.8 V



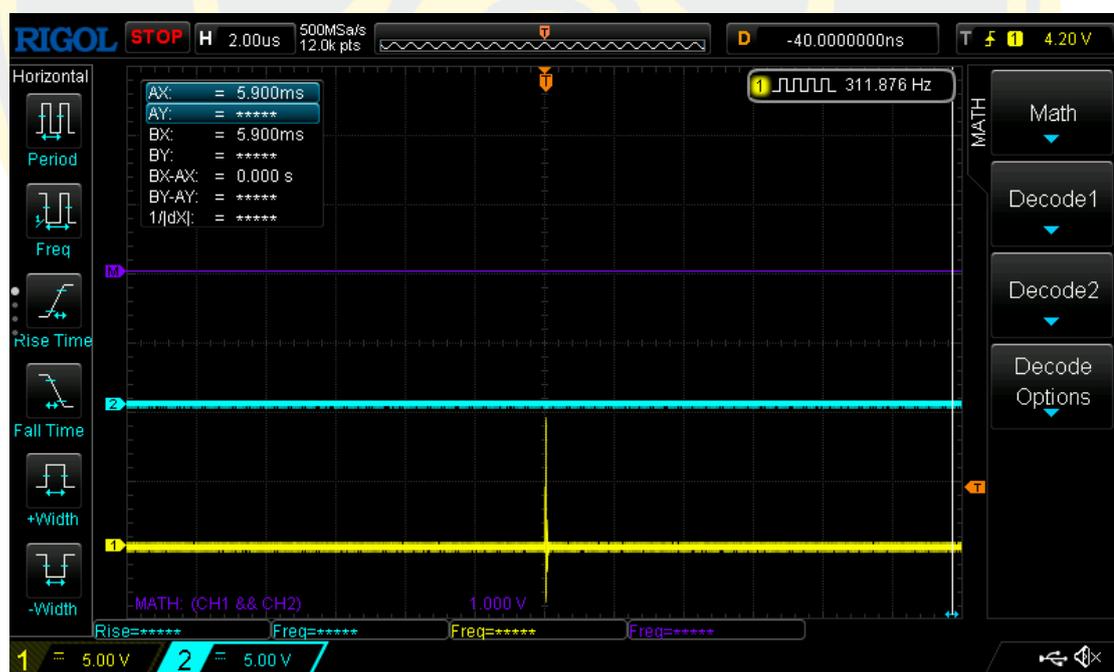
รูปที่ 4. 2: สัญญาณพัลส์แคบมีความกว้างพัลส์ 10 ns

4.2 ผลการดำเนินงานวิจัยในส่วนของภาครับ

ในส่วนของภาครับนั้นเริ่มหลังจากการที่แหล่งกำเนิดเลเซอร์พัลส์แคบถูกลดทอนแสงจนเกิดเป็นโฟตอนเดี่ยวโดยใช้อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ตามที่ต้องการแล้ว โฟตอนเดี่ยวที่ได้นั้นจะถูกทำให้เป็นลำวอร์เท็กซ์ของแสงก่อนที่จะเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง โดยอุปกรณ์ที่ถูกใช้เพื่อรับสัญญาณโฟตอนเดี่ยวเหล่านั้นคือสายไฟเบอร์ออปติก (Fiber Optics) ที่ถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่อง APD สัญญาณที่ได้นั้นสามารถดูได้จากการต่อเครื่อง APD เข้ากับออสซิลโลสโคปเพื่อเก็บวิเคราะห์ผลที่ได้

4.2.1 สัญญาณมืด (Dark-count)

โดยหลักการนั้นก่อนที่จะทำการเก็บผลการทดลองที่มีการใช้เครื่อง APD ฉากจะถูกปิดที่บริเวณด้านหน้าของตัวตรวจวัด และทำการตรวจสอบค่าของสัญญาณมืดก่อนทำการทดลองเสมอ โดยจุดประสงค์ของการตรวจสอบนั้น เพื่อให้ผู้ที่ทำวิจัยสามารถตรวจสอบและทราบถึงความพร้อมในการใช้งานของอุปกรณ์ APD (โดยค่าที่ปกติของสัญญาณมืดก่อนการใช้งานที่ควรได้นั้น ไม่ควรมีค่าเกิน 500 Hz)



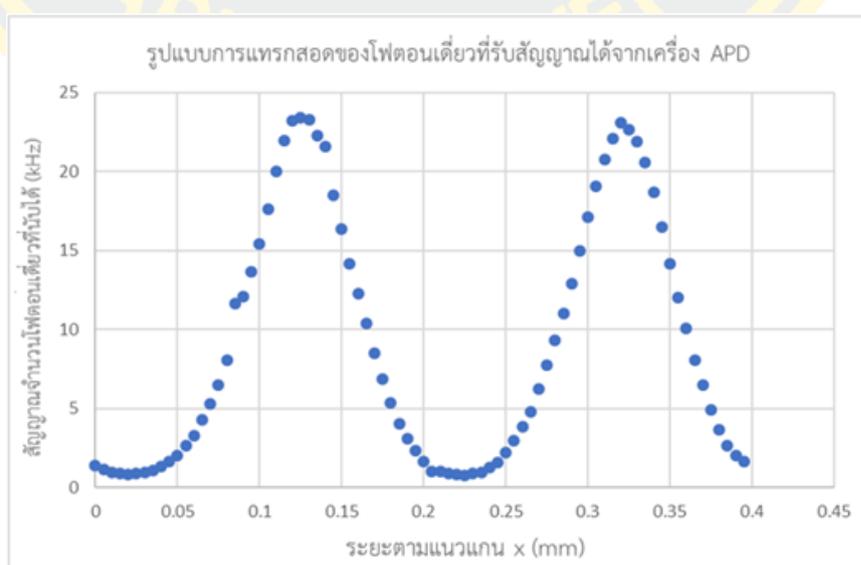
รูปที่ 4.3: สัญญาณมืดที่มีค่าสัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับได้ 311.876 Hz

จากรูปที่ 4.3 แสดงภาพสัญญาณมืดเมื่อฉากถูกใช้กันบริเวณหน้าไฟเบอร์ออปติกก่อนเริ่มทำการเก็บผลที่ได้จากการทดลอง โดยสัญญาณมืดที่ได้นั้นมีค่าสัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับได้อยู่ที่ 311.876 Hz ซึ่งเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ APD นั้นอยู่ในสภาพที่พร้อมสำหรับใช้งาน

4.2.2 รูปแบบการแทรกสอดของโฟตอนเดี่ยว

เมื่อแหล่งกำเนิดแสงเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงเลี้ยวเบนที่ระยะทาลบอดจะปรากฏภาพรูปแบบการแทรกสอดที่เรียกว่า Self-Imaging ซึ่งมีลักษณะเป็นคาบที่มีความกว้างเท่ากับคาบของเกรตติงเลี้ยวเบนนั้นๆ ในที่นี้ผู้วิจัยใช้แหล่งกำเนิดคือโฟตอนเดี่ยว ที่มีการสร้างฐานเวลาโดยการใช้วงจรพัลส์แคบจนได้เป็นสัญญาณที่มีความถี่อยู่ที่ 1MHz ขนาดความกว้างพัลส์ FWHM 10 ns ก่อนที่จะมีการใช้อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ลดทอนแสงจนได้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณโฟตอนเดี่ยวที่ใช้ในการทดลอง

ในส่วนของการเก็บผลทดลองนั้นมีการเลื่อนเกรตติงเลี้ยวเบนตัวที่สอง (ทำหน้าที่เป็นหน้ากาก) ในทิศแกน x โดยทำการเลื่อนเป็นจุด จุดละ 0.005 mm เป็นจำนวน 80 จุด เพื่อให้ครอบคลุมขนาดคาบของเกรตติง ซึ่งในทุกครั้งที่เลื่อน 1 จุดจะทำการเก็บค่าสัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับได้ 1 ค่า จนครบตามจำนวนที่ต้องการก่อนที่จะวาดกราฟผลการทดลองที่ได้ให้แสงออกมาในรูปแบบของสัญญาณโฟตอนเดี่ยวเมื่อเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง ซึ่งในการวาดกราฟนั้นเป็นการวาดกราฟระหว่างสัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับได้ (kHz) และ ตำแหน่งที่เปลี่ยนไปตามแนวแกน x โดยรูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการแทรกสอดที่ระยะทาลบอด $Z = 51.28$ mm โดยมีคาบของเกรตติง $d = 200$ μm ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง $\lambda = 785$ nm



รูปที่ 4.4: รูปแบบการแทรกสอดของโฟตอนเดี่ยวที่รับสัญญาณได้จากเครื่อง APD

4.2.3 การระบุวอร์เท็กซ์ของแสง

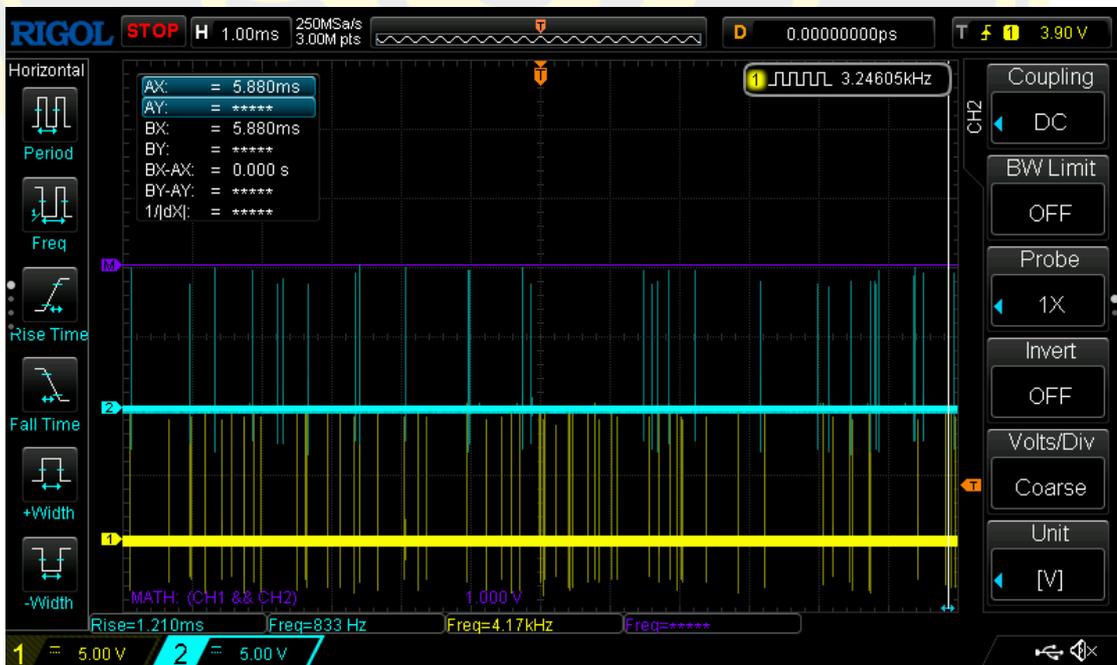
ในการดำเนินการทดลองนั้นผู้วิจัยได้มีการศึกษาสัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับได้ที่มีคุณสมบัติของวอร์เท็กซ์ของแสงที่มีสถานะแตกต่างกัน 4 สถานะ นั่นคือที่ $l = \pm 1$ และ $l = \pm 2$ โดยในการทดลองโฟตอนเดียวนั้นมีการออกแบบการทดลองเพื่อให้ผู้วิจัยนั้นสามารถตรวจสอบได้ว่าสัญญาณที่ได้รับนั้นคือสัญญาณโฟตอนเดี่ยวตลอดระยะเวลาการทดลอง เมื่อทำการเก็บผลการทดลองที่ได้นั้นจึงมีการเปรียบเทียบสัญญาณโฟตอนเดี่ยวที่ได้จากไฟเบอร์ออปติกทั้งสองทาง (มีการแบ่งแสงโดยใช้ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter)) โดยใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในเครื่องออสซิลโลสโคปเพื่อทำการ แอน (AND) สัญญาณที่ได้จากทั้งสองสาย ในที่นี้ผลที่ได้จากฟังก์ชันดังกล่าวจะถูกแสดงในรูปแบบของสายสัญญาณสีม่วง ซึ่งหากในเวลาเดียวกันนั้นสัญญาณที่ได้รับจากไฟเบอร์ออปติกทั้งสองทางตรงกัน (หมายความว่าไม่เป็นโฟตอนเดี่ยว) จะเกิดสัญญาณปรากฏขึ้นที่สายสัญญาณสีม่วงที่แสดงบนหน้าจอออสซิลโลสโคปในรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 และในทางกลับกันหากสัญญาณที่ได้รับจากไฟเบอร์ออปติกทั้งสองทางไม่ตรงกันในเวลาเดียวกัน (หมายถึงโฟตอนเดี่ยว) จะไม่เกิดสัญญาณปรากฏขึ้นที่สายสัญญาณสีม่วง



รูปที่ 4.5: สัญญาณที่ได้โดยที่วอร์เท็กซ์ของแสงมีสถานะ $l = -1$ สัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับได้ 3.61203 kHz



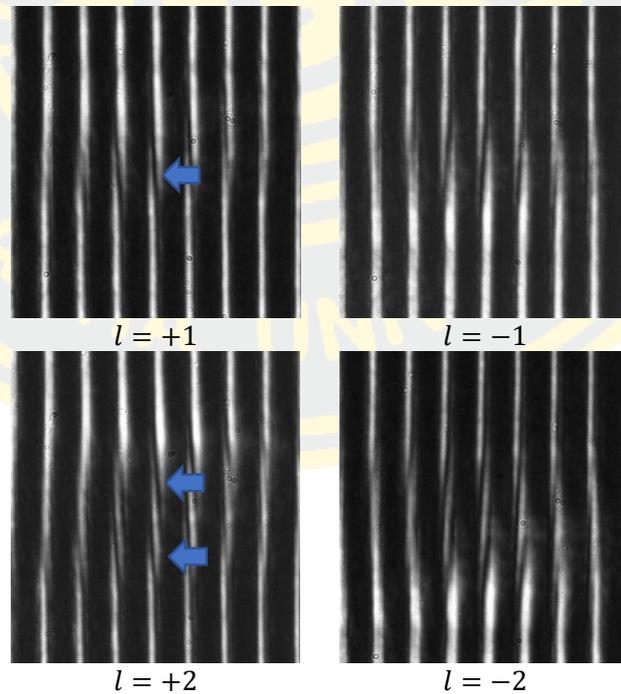
รูปที่ 4.6: สัญญาณที่ได้โดยที่วอร์เท็กซ์ของแสงมีสถานะ $l = +1$ สัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับได้ 3.01545 kHz



รูปที่ 4. 7: สัญญาณที่ได้โดยที่วอร์เท็กซ์ของแสงมีสถานะ $l = -2$ สัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับได้ 3.24605 kHz



รูปที่ 4.8: สัญญาณที่ได้โดยที่วอร์เท็กซ์ของแสงมีสถานะ $l = +2$ สัญญาณจำนวนโฟตอนเดี่ยวที่นับได้ 2.20343 kHz



รูปที่ 4.9: รูปแบบวิวัฒนาการแทรกสอดของวอร์เท็กซ์ของแสงที่มีสถานะ $l = +1$, $l = -1$, $l = +2$ และ $l = -2$ [47]

รูปที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 สัญญาณจากช่อง (Chanel) ที่ 1 ถูกแสดงด้วยสัญญาณสีเหลือง โดยเป็นสัญญาณที่ได้จากไฟเบอร์ออปติกที่รับสัญญาณทางตรงของตัวแยกลำแสง และสัญญาณจากช่องที่ 2 ถูกแสดงด้วยสัญญาณสีฟ้า โดยทั้งสองสัญญาณนั้นจะถูกทำการแอน (AND) สัญญาณเพื่อตรวจสอบความเป็นโพตอนเดี่ยวตลอดการทดลอง ซึ่งถูกแสดงด้วยสัญญาณที่ม่วงที่ได้ โดยผลการทดลองที่ได้นั้นทำให้เห็นถึงความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างระหว่างความต่างทั้ง 4 ตั้งแต่ที่สถานะวอร์เท็กซ์ของแสงอยู่ที่ $l = -1$, $l = +1$, $l = -2$ และ $l = +2$ โดยสัญญาณจำนวนโพตอนเดี่ยวที่นับได้นั้นคือ 3.61203 kHz, 3.01545 kHz, 3.24605 และ 2.20343 kHz ตามลำดับ

ความสามารถในการแยกแยะความต่างของแต่ละสถานะที่แสดงให้เห็้นนั้นเกิดขึ้นได้จากการที่โพตอนเดี่ยวเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง ซึ่งที่ระยะทาลบอดนั้นเมื่อแสงผ่านเกรตติงเลี้ยวเบน สามารถแสดงให้เห็นภาพวีรรอยการแทรกสอดของทาลบอดที่มีรอยบาก (Tilted dark stripe) ที่เฉพาะแตกต่างกันไปในแต่ละความต่างของสถานะวอร์เท็กซ์ของแสง (รูปที่ 4.9) ด้วยเหตุนี้เองเมื่อโพตอนเดี่ยวเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงที่ระยะทาลบอดนั้น ทำให้สัญญาณที่ได้เกิดความสามารถในการแยกแยะความต่างของวอร์เท็กซ์ของแสงในแต่ละสถานะ โดยเมื่อแหล่งกำเนิดที่ใช้คือโพตอนเดี่ยว ทำให้ผลการทดลองที่ได้นั้นออกมาในรูปแบบของสัญญาณจำนวนโพตอนเดี่ยวที่นับได้ที่แตกต่างกันนั่นเอง

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองการประยุกต์ใช้รีวอร์อยการแทรกสอดของทาลบอตในพิสัยสนามใกล้ด้วยโฟตอนเดี่ยว จากการสร้างฐานเวลาด้วยวงจรพัลส์แคบและการใช้ไฟเบอร์ออปติกเป็นอุปกรณ์ในการรับสัญญาณโฟตอนเดี่ยวที่ได้ก่อนส่งไปยังเครื่อง APD เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปและอภิปรายผลได้ดังนี้

5.1 ศึกษาการสร้างฐานเวลาและโฟตอนเดี่ยว

จากการศึกษาการสร้างวงจรพัลส์แคบเพื่อสร้างฐานเวลาให้กับเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 785 nm โดยการสร้างสัญญาณแบบพัลส์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function generator) ทำการกำหนดความถี่ของสัญญาณอยู่ที่ 500 KHz เข้าสู่วงโคจรไดโอดเลเซอร์แบบพัลส์แคบ หลักการที่ใช้คือลอจิกเกต (Logic gate) นั่นคือใช้ไอซีอินพุทเกต เพื่อทำการหน่วงสัญญาณที่มาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณก่อนที่จะทำการเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณที่มาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณและสัญญาณที่ถูกหน่วง เมื่อสัญญาณทั้งสองถูกเทียบกันแล้วนั้น สัญญาณที่ได้ออกมาจะมีความกว้างพัลส์อยู่ที่ 10 ns และมีความถี่ของสัญญาณอยู่ที่ 1MHz ซึ่งจากการศึกษาพบว่าไอซีที่ไม่เหมาะสมในการใช้งานนั้นส่งผลอย่างมากในการสร้างวงจรพัลส์แคบ โดยปัญหาที่พบนั้นคือพัลส์มีขนาดกว้างกว่าที่ต้องการ ทำให้การเลือกไอซีที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างมากในการสร้างวงจร โดยในการสร้างวงจรนั้นจำเป็นต้องรู้ความถี่ที่กำหนดจากเครื่องกำเนิดสัญญาณและความถี่ที่ต้องการ รวมไปถึงเวลา rise-time, fall-time ที่แตกต่างกันไปในไอซีแต่ละรุ่น เพื่อให้สามารถคำนวณหาไอซีที่มีค่าการหน่วงเวลาตรงตามที่ต้องการได้

5.2 ศึกษารูปแบบการแทรกสอดของโฟตอนเดี่ยวเมื่อผ่านเกรตติง

ในการศึกษารูปแบบการแทรกสอดของโฟตอนเดี่ยวเมื่อผ่านเกรตติงพบว่าที่ระยะทาลบอตนั้น ลักษณะการแทรกสอดที่ได้มีลักษณะสอดคล้องกับรูปแบบการแทรกสอดของแสงเมื่อผ่านเกรตติง เพื่อสร้างภาพสัญญาณการแทรกสอดดังกล่าว ทางผู้วิจัยได้มีการเลื่อนเกรตติงตัวที่สองในทิศทางแกน x เพื่อทำหน้าที่เป็นหน้าฉากให้กับตัวรับสัญญาณไฟเบอร์ออปติก

5.3 ศึกษาวิธีรอยการแทรกสอดของทาลบอตเพื่อตรวจจ็วอร์เท็กซ์ของแสงด้วยโฟตอนเดี่ยว

จากการศึกษาการแทรกสอดของทาลบอตเพื่อตรวจจ็วอร์เท็กซ์ของแสงด้วยโฟตอนเดี่ยวนั้น ในส่วนของโฟตอนเดี่ยวทางผู้วิจัยได้ทำการแบ่งแสงด้วยตัวแบ่งแสงก่อนทำการเทียบสัญญาณเพื่อตรวจสอบความเป็นโฟตอนเดี่ยว โดยในขั้นตอนนี้ เพื่อให้มั่นใจว่าแสงนั้นถูกแยกด้วยตัวแยกแสงอย่างเท่าเทียมกันจึงต้องมีการใช้เครื่องวัดกำลัง (Power meter) เพื่อตรวจสอบว่าแสงทั้งสองทางนั้นถูกแบ่งอย่างเท่ากันก่อนเข้าตัวรับสัญญาณไฟเบอร์ออปติก

ในส่วนของการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากเครื่อง APD นั้นพบว่าปัญหาในการเก็บผลการทดลองคือการที่รอยบากที่เกิดจากวอร์เท็กซ์ของแสงนั้นไม่ตรงตรงบริเวณด้านหน้าของไฟเบอร์ออปติก ผู้ทดลองจึงได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ใช้เลื่อนตำแหน่ง (translation stage) เพื่อทำการเลื่อนตำแหน่งของไฟเบอร์ออปติกในทิศทางแกน x เพื่อหาจุดที่รอยบากตกกระทบบริเวณหน้าไฟเบอร์ออปติกพอดี

บรรณานุกรม

1. Sn_Explores, *Understanding light and other forms of energy on the move*. 2020.
2. Sastry, S.K., A.K. Datta, and R.W. Worobo, *Ultraviolet light*. Journal of food science, 2000. **65**: p. 90-92.
3. *The Wavelength Chart - Light & Health Benefits | Joovv*. 2023.
4. Tzung, T.Y., K.H. Wu, and M.L. Huang, *Blue light phototherapy in the treatment of acne*. Photodermatology, photoimmunology & photomedicine, 2004. **20**(5): p. 266-269.
5. Elman, M. and J. Lebzelter, *Light therapy in the treatment of acne vulgaris*. Dermatologic surgery, 2004. **30**(2): p. 139-146.
6. Russell, B., N. Kellett, and L. Reilly, *A study to determine the efficacy of combination LED light therapy (633 nm and 830 nm) in facial skin rejuvenation*. Journal of Cosmetic and Laser Therapy, 2005. **7**(3-4): p. 196-200.
7. Lanzafame, R.J., et al., *The growth of human scalp hair in females using visible red light laser and LED sources*. Lasers in surgery and medicine, 2014. **46**(8): p. 601-607.
8. *Coherence (physics) - Wikipedia*. 2023; Available from: [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Coherence_\(physics\)](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Coherence_(physics)).
9. *Incoherent Light Source Physics*. 2023; Available from: <https://www.newport.com/n/incoherent-light-physics>.
10. *Single Mode vs. Multi-Mode Fiber Optic Cable | Multicom*. 2023.
11. Xu, M. and R. Alfano, *Circular polarization memory of light*. Physical Review E, 2005. **72**(6): p. 065601.
12. Cheng, W., *Optical vortex beams: Generation, propagation and applications*. 2013: University of Dayton.
13. Li, X., et al., *Perfect optical vortex array for optical communication based on orbital angular momentum shift keying*. Journal of Optics, 2018. **20**(12): p. 125604.
14. Shao, W., et al., *Free-space optical communication with perfect optical vortex beams multiplexing*. Optics Communications, 2018. **427**: p. 545-550.
15. Wang, J., *Advances in communications using optical vortices*. Photonics Research, 2016. **4**(5): p. B14-B28.

16. Wang, Z., N. Zhang, and X.-C. Yuan, *High-volume optical vortex multiplexing and demultiplexing for free-space optical communication*. Optics Express, 2011. **19**(2): p. 482-492.
17. Jantzi, A., et al., *Enhanced underwater ranging using an optical vortex*. Optics express, 2018. **26**(3): p. 2668-2674.
18. Gecevičius, M., et al., *Single beam optical vortex tweezers with tunable orbital angular momentum*. Applied Physics Letters, 2014. **104**(23): p. 231110.
19. Kuo, C.-F. and S.-C. Chu, *Numerical study of the properties of optical vortex array laser tweezers*. Optics express, 2013. **21**(22): p. 26418-26431.
20. Zhu, L., et al., *Calculating the torque of the optical vortex tweezer to the ellipsoidal microparticles*. Optics Communications, 2015. **354**: p. 34-39.
21. Dienerowitz, M., et al., *Optical vortex trap for resonant confinement of metal nanoparticles*. Optics express, 2008. **16**(7): p. 4991-4999.
22. Gahagan, K. and G. Swartzlander, *Trapping of low-index microparticles in an optical vortex*. JOSA B, 1998. **15**(2): p. 524-534.
23. Gahagan, K. and G.J. Swartzlander, *Optical vortex trapping of particles*. Optics Letters, 1996. **21**(11): p. 827-829.
24. Ng, J., Z. Lin, and C.T. Chan, *Theory of optical trapping by an optical vortex beam*. Physical review letters, 2010. **104**(10): p. 103601.
25. Dickey, F.M., *Laser beam shaping: theory and techniques*. 2018: CRC press.
26. Lee, W., X.-C. Yuan, and W. Cheong, *Optical vortex beam shaping by use of highly efficient irregular spiral phase plates for optical micromanipulation*. Optics letters, 2004. **29**(15): p. 1796-1798.
27. Algorri, J.F., et al., *Generation of optical vortices by an ideal liquid crystal spiral phase plate*. IEEE electron device letters, 2014. **35**(8): p. 856-858.
28. Wang, X., et al., *Recent advances on optical vortex generation*. Nanophotonics, 2018. **7**(9): p. 1533-1556.
29. Žukauskas, A., M. Malinauskas, and E. Brasselet, *Monolithic generators of pseudo-nondiffracting optical vortex beams at the microscale*. Applied Physics Letters, 2013. **103**(18): p. 181122.

30. Dufresne, E.R. and D.G. Grier, *Optical tweezer arrays and optical substrates created with diffractive optics*. Review of scientific instruments, 1998. **69**(5): p. 1974-1977.
31. Ruane, G., et al. *Scalar vortex coronagraph mask design and predicted performance*. in *Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets IX*. 2019. SPIE.
32. Wei, H., A.K. Amrithanath, and S. Krishnaswamy, *3D printing of micro-optic spiral phase plates for the generation of optical vortex beams*. IEEE Photonics Technology Letters, 2019. **31**(8): p. 599-602.
33. Panthong, P., et al., *High-contrast optical vortex detection using the Talbot effect*. Applied Optics, 2018. **57**(7): p. 1657-1661.
34. Buathong, S., S. Srisuphaphon, and S. Deachapunya, *Probing vortex beams based on Talbot effect with two overlapping gratings*. Journal of Optics, 2022. **24**(2): p. 025602.
35. Atkins, S. and B. Fischer, *All-optical pulse rate multiplication using fractional Talbot effect and field-to-intensity conversion with cross-gain modulation*. IEEE Photonics Technology Letters, 2003. **15**(1): p. 132-134.
36. Aymerich, M., D. Nieto, and M.T. Flores-Arias, *Laser-based surface multistructuring using optical elements and the Talbot effect*. Optics Express, 2015. **23**(19): p. 24369-24382.
37. Kono, Y., et al., *A coherent all-solid-state laser array using the Talbot effect in a three-mirror cavity*. IEEE journal of quantum electronics, 2000. **36**(5): p. 607-614.
38. Packcross, B., R. Eschbach, and O. Bryngdahl, *Achromatization of the self-imaging (Talbot) effect*. Optics communications, 1984. **50**(4): p. 205-209.
39. Sungar, N., et al., *Hydrodynamic analog of particle trapping with the Talbot effect*. Physical Review Fluids, 2017. **2**(10): p. 103602.
40. Deachapunya, S., et al., *Realization of the single photon Talbot effect with a spatial light modulator*. Optics express, 2016. **24**(18): p. 20029-20035.
41. Hitz, C.B., J.J. Ewing, and J. Hecht, *Introduction to laser technology*. 2012: John Wiley & Sons.
42. *Jones calculus - Wikipedia*. 2024; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Jones_calculus.
43. *Introduction to Laser Technology*. 2023.
44. *Single-photon source - Wikipedia*. 2023; Available from:

https://en.wikipedia.org/wiki/Single-photon_source.

45. Azzouz, H., *Creation and Detection of Single Photons*. 2016.
46. Shen, Y., et al., *Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities*. *Light: Science & Applications*, 2019. **8**(1): p. 90.
47. Deachapunya, S., et al., *Single-photon vortex beam detection with near-field diffraction*. *Physical Review A*, 2023. **108**(3): p. 033502.
48. Agarwal, T., *Avalanche Photodiode : Construction, Working & Its Applications*. 2021.
49. *The Best Guide to the Avalanche Photodiode*. 2024.
50. admin, *Avalanche photodiode or APDs: Working, Materials & its Uses - Electricalguide360*. 2021.
51. *Thorlabs.com - Single Photon Detectors*. 2023; Available from:
https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9_PF.cfm?ObjectGroup_ID=5255.

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	พิศสุนีย์ ดีชื่น
วัน เดือน ปี เกิด	7 พฤษภาคม 2542
สถานที่เกิด	ขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	37/11 ต.หนองปรือ อ.บางละมุง จ.ชลบุรี 20150
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

