

การสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยการแทรกสอดของลำแสงเลเซอร์

ปริญญาานิพนธ์
ของ
สมเสมอ ทักษิณ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
พฤษภาคม 2551

การสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยการแทรกสอดของลำแสงเลเซอร์

ปริญญานิพนธ์
ของ
สมเสมอ ทักษิณ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
พฤษภาคม 2551
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยการแทรกสอดของลำแสงเลเซอร์

บทคัดย่อ
ของ
สมเสมอ ทักษิณ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
พฤษภาคม 2551

สมเสมอ ทักษิณ. (2551). การสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยการแทรกสอดของ
ลำแสงเลเซอร์. ปริญญาโท กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: อาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตน์กุล,
ผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ศิลป์สกุลสุข.

เพื่อศึกษาการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยการแทรกสอดของลำแสงเลเซอร์ เราสร้าง
เกรตติงที่มีระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติงประมาณ 1-2 ไมโครเมตร โดยการบันทึกรูปแบบการ
แทรกสอดของลำแสงเลเซอร์สองลำแสงลงบนแผ่นฟิล์มโฟโตรีซิสแบบ PFG-01 แล้วนำไปล้างด้วย
น้ำยาล้างรูป เมื่อทำการวัดประสิทธิภาพการเลี้ยวเบนสูงสุด ซึ่งคือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มแสง
ของการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง กับความเข้มแสงตกกระทบที่ไม่ได้ผ่านเกรตติง ประสิทธิภาพที่วัดได้
มีค่าประมาณ 2%

TRANSMISSION PLANE GRATING FABRICATION BY INTERFERENCE
OF LASER BEAMS

AN ABSTRACT
BY
SOMSAMER THAKSIN

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Education Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
May 2008

Somsamer Thaksin. (2008). *Transmission Plane Grating Fabrication by Interference of Laser Beams*. Master thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Somsak Maneerattanakul, Asst. Prof. Bancha Silskulsuk.

The formation of transmission plane gratings by interference of laser beams is investigated. Various optical gratings with spacing around 1-2 micrometer were fabricated by recording the interference pattern of two laser beams on PFG-01 photoresists. The photoresists were then developed in developer. The maximum diffraction efficiency i.e., the ratio between the first order diffraction power and the incident power, was found to be around 2%.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยการแทรกสอดของลำแสงเลเซอร์

ของ
สมเสมอ ทักษิณ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญสิริ จีระเดชากุล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน

(อาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตน์กุล)

.....ประธาน

(อาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แคมมณี)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ศิลป์สกุลสุข)

.....กรรมการ

(อาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตน์กุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ศิลป์สกุลสุข)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เชื้องกา)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตน์กุล ประธานควบคุมปริญญาโท และผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ศิลป์สกุลสุข กรรมการควบคุมปริญญาโท ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขตลอดจนช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แคมมณี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เชียงกา ที่ได้ร่วมเป็นกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาโท และกรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ที่ทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการดำเนินการทำปริญญาโทจนสำเร็จ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท วิชาเอกฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา คุณภานู สัจจิวิโส และทุกๆคนในครอบครัว ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือ ให้การสนับสนุนในการศึกษาแก่ข้าพเจ้า จนสามารถทำปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สมเสมอ ทักษิณ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
การเลี้ยวเบนของแสง.....	4
การแทรกสอดของแสง.....	13
เกรตติง.....	33
โฮโลกราฟีคเกรตติง.....	41
ไดโอดรับแสง.....	50
เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	54
3 วิธีดำเนินการวิจัย	55
การกำหนดอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	55
การสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่าน.....	57
การวิเคราะห์ข้อมูลและการตรวจสอบความถูกต้อง.....	59
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	62
5 สรุปอภิปรายและข้อเสนอแนะ	70
สรุปผลการทดลอง.....	70
อภิปรายผลการทดลอง.....	70
ข้อเสนอแนะ.....	71
บรรณานุกรม	73
ประวัติย่อผู้วิจัย	76

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ผลการวัดค่ามุม θ ระหว่างสองลำแสง และนำไปคำนวณหาระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติงตามทฤษฎี.....	66
2 ผลการวัดระยะทางที่แสงเลี้ยวเบนห่างจากแนวกลาง กับการเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่หนึ่ง และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า d	67
3 ผลการเปรียบเทียบค่า d ที่คำนวณได้จากการวัดกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี.....	68
4 ผลการคำนวณจำนวนร่องของเกรตติงที่สร้างขึ้น เปรียบเทียบกับจำนวนร่องที่คำนวณได้ตามทฤษฎี.....	68
5 ผลการวัดความเข้มแสงที่ผ่านเกรตติงแล้วเกิดการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง เทียบกับความเข้มแสงที่ไม่ได้ผ่านเกรตติง.....	69

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 การเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ซึ่งมีเลนส์ช่วยทำให้เกิดภาพบนฉาก.....	5
2 การเลี้ยวเบนของแสงในทิศทางที่ต่างกัน (a) แสงไม่เกิดการเลี้ยวเบน เป็นจุดสว่าง (b) และ (c) ความแตกต่างของวิถีของแสง ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน ได้เป็นแถบมืดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ.....	7
3 ความเข้มแสงที่สัมพันธ์กับลวดลายการเลี้ยวเบนเมื่อแสงผ่านช่องแคบเดี่ยว.....	13
4 สมบัติอาพันธ์ของคลื่นแสง.....	14
5 หลักการซ้อนทับของคลื่น 2 คลื่น (a) มีเฟสตรงกัน และ (b) เฟสตรงข้าม.....	15
6 การแทรกสอดของแสงจากการทดลองของยัง.....	16
7 วิถีของแสงเมื่อผ่านช่องแคบคู่จากการทดลองของยัง.....	16
8 การแทรกสอดแบบเสริมเมื่อแสงผ่านช่องแคบคู่จากการทดลองของยัง.....	18
9 การกระจายความเข้มแสงในลวดลายการแทรกสอดจากการทดลองของยัง.....	24
10 ความเข้มแสงจากการแทรกสอดของแสงผ่านช่องแคบคู่ซึ่งประกอบด้วยความเข้มแสงจากการแทรกสอด และความเข้มแสงจากการเลี้ยวเบน	26
11 ความเข้มรวมจากการแทรกสอดของแสงผ่านช่องแคบคู่.....	27
12 การแทรกสอดของแสงเมื่อผ่านแหล่งกำเนิดอาพันธ์หลายแหล่ง.....	28
13 การกระจายความเข้มของการแทรกสอดของแสงจากแหล่งกำเนิดคลื่นที่มีจำนวนช่องแคบ N แตกต่างกัน.....	32
14 อันดับการเลี้ยวเบนของแสง (a) ผ่านเกรตติงระนาบแบบส่งผ่าน และ (b) เกรตติงสะท้อน.....	34
15 การเลี้ยวเบนของแสงเมื่อผ่านเกรตติงแบบขีด.....	35
16 แสงผสมผ่านเกรตติงแล้วเลี้ยวเบนแยกเป็นแสงสีน้ำเงินและแสงสีแดง.....	36
17 การกระจายความเข้มของการแทรกสอดและเลี้ยวเบนของแสงเมื่อผ่านเกรตติง.....	37
18 ลวดลายของการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงจากแหล่งกำเนิดคลื่นที่มีจำนวนช่องแคบ N แตกต่างกัน	38
19 การแทรกสอดของลำแสงหน้าคลื่นทรงกลมผ่านรูเข็ม A และ B	41
20 การบันทึกการแทรกสอดของลำแสงเดี่ยว	42
21 รูปแบบของการแทรกสอดของสองลำแสงที่มีความยาวคลื่น λ เท่ากัน ทำมุมต่อกัน 2θ ในแนวระนาบ	43

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
22 รูปแบบของการแทรกสอดของสองลำแสงที่มีความยาวคลื่น λ เท่ากัน ทำมุมต่อกัน 2θ ในแนวระนาบ	44
23 ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแถบสว่างสองแถบที่อยู่ติดกัน d	45
24 รูปแบบการเกิดรูปร่างแบบสันเขาและแอ่งลึกของแผ่นโพโตรีซิสแบบบวก.....	46
25 รูปโครงสร้างของร่อง (a) เกรตติงแบบขีด และ (b) โฮโลกราฟฟิคเกรตติง	48
26 รูปโครงสร้างของไดโอดรับแสงชนิดรอยต่อพีเอ็น	50
27 อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่เข้าไปในเขตปลอดพาหะเกิดเป็นกระแสโฟโต	52
28 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสกับความเข้มแสงและแรงดันไบแอสย้อนกลับ ของโฟโตไดโอด	53
29 การทดลองการสร้างลวดลายการแทรกสอดและการบันทึกลงบน แผ่นฟิล์มโพโตรีซิส.....	58
30 การทดลองเรื่องการเลี้ยวเบนของแสง.....	61
31 แสงผ่านเกรตติงแล้วเกิดการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง.....	64
32 แสงผ่านเกรตติงแล้วเกิดการเลี้ยวเบนตกระทบบนอุปกรณ์รับแสง.....	65

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

แสงขาว (White Light) ประกอบด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆกัน แสงสี (Coloured Light) ที่นัยน์ตาสามารถมองเห็นได้เรียงจากความยาวคลื่นมากไปสู่ความยาวคลื่นน้อย ได้แก่ แดง แสด เหลือง เขียว น้ำเงิน คราม และม่วง ตามลำดับ การกระจายของแสง (Dispersion of Light) นี้เรียกว่า สเปกตรัมของแสง (Spectrum of Light) การกระจายของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงขาวผ่านตัวกลางโปร่งใส เช่น ปริซึม (Prism) จากกฎของสเนล (Snell's Law) แสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆกัน จะมีมุมหักเหต่างๆกัน ดังนั้น รังสีแสงที่ออกจากปริซึมจะแยกออกเป็นแสงสีต่างๆกัน

การศึกษาเกี่ยวกับสเปกตรัมของแสงในปัจจุบันนิยมใช้ เกรตติง (Grating) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction Grating) ใช้ในการหาความยาวคลื่นของแสง เกรตติงเลี้ยวเบนประกอบด้วยร่องที่ขนานกันจำนวนมาก และมีระยะระหว่างร่องเท่ากัน ในปัจจุบันนิยมใช้เกรตติงที่มีจำนวน 1,000–2,000 ร่องต่อมิลลิเมตร หลักการของเกรตติงเลี้ยวเบน จะคล้ายกับการทดลองของยัง (Young's Experiment) ที่เกี่ยวกับช่องแคบคู่ (Double Slits) ลวดลายการแทรกสอดที่เกิดจากเกรตติงเลี้ยวเบนจะคมชัดกว่าและแคบกว่า เมื่อรังสีของแสงผ่านแต่ละช่องแคบ จะมีมุมเบี่ยงเบน (Deviation Angle) ต่างๆกัน รังสีเหล่านี้จะไปแทรกสอดแบบเสริมกันบนฉาก เกิดเป็นแถบสว่าง และแทรกสอดแบบหักล้างกันเกิดเป็นแถบมืด สลับกันไป ความสว่างที่ปรากฏบนฉากที่ตำแหน่งต่างกันจะไม่เท่ากัน ตามหลักการเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ (Fraunhofer Diffraction) โดยแถบสว่างตรงกลางจะเป็นสีขาวซึ่งมีความสว่างมากที่สุด เพราะแสงเหล่านี้จะแทรกสอดกันบนฉากที่ตำแหน่งเดียวกัน จึงเห็นสว่างเป็นสีขาวเหมือนกับต้นกำเนิดแสง และที่เลขอันดับอื่นๆ จะเห็นเป็นสีรุ้งแผ่กระจายออกไปเป็นสเปกตรัมแบบต่อเนื่อง โดยสเปกตรัมในอันดับที่หนึ่งจะสว่างกว่าสเปกตรัมในอันดับที่สอง และอันดับที่สองจะสว่างกว่าอันดับที่สาม ตามลำดับ

ปัจจุบัน การวัดความยาวคลื่นของแสง นิยมใช้เกรตติงสเปกโตรมิเตอร์ (Grating Spectrometer) ซึ่งเป็นทัศนอุปกรณ์ (Optical Instrument) ที่ใช้วัดความยาวคลื่นของแสงโดยตรง และได้มีการใช้เกรตติงสเปกโตรมิเตอร์ในการศึกษาสเปกตรัมของอะตอมหรือโมเลกุล จึงได้มีการพัฒนาและผลิตเกรตติงให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

วิธีการสร้างเกรตติง อาจทำโดยขีดเส้นบนผิวแผ่นแก้วราบด้วยปลายคมเพชร เรียกว่า เกรตติงแบบขีด (Ruled Grating) บริเวณระหว่างเส้นที่ถูกขีดจะเป็นร่องเล็กยาวขนานกัน ซึ่งแสงสามารถทะลุผ่านร่องเหล่านี้ได้ เรียกเกรตติงชนิดนี้ว่า เกรตติงส่งผ่าน (Transmission Grating) หรือทำจากการขีดเส้นบนผิวโลหะหรือแก้วที่ฉาบเงินไว้ ทำให้แสงสะท้อนจากบริเวณระหว่างเส้นที่

ขีดเรียกว่า เกรตติงสะท้อน (Reflection Grating) ปัจจุบันได้มีการสร้างเกรตติงโดยใช้หลักการแทรกสอดของแสงแทนการใช้ปลายคมเพชรขีด เรียกว่า โฮโลกราฟฟิกเกรตติง (Holographic Grating)

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่าน โดยใช้เทคนิคโฮโลกราฟฟิกเกรตติง โดยใช้หลักการแทรกสอดของแสงตามทฤษฎีของยัง และหลักการเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ ใช้แสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีกำลัง 5 มิลลิวัตต์ มาแยกเป็นสองลำแสงโดยกระจกแยกลำแสง (Beam Splitter Mirror) และนำลำแสงทั้งสองมาแทรกสอดกันบนแผ่นโฟโตเรซิส (Photoresist) แล้วนำแผ่นโฟโตเรซิสไปผ่านกระบวนการล้างกับน้ำยาเคมี ได้เป็นแถบมืดและแถบสว่าง แถบสว่างคือบริเวณที่แสงสามารถส่งผ่านได้ ส่วนแถบมืดคือบริเวณที่แสงไม่สามารถส่งผ่านได้ ทหาระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของแสงและเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติงที่คำนวณได้ตามทฤษฎี พร้อมทั้งคำนวณหาจำนวนร่องของเกรตติง และหาประสิทธิภาพของเกรตติงระนาบแบบส่งผ่าน โดยการวัดความเข้มแสงของการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง เทียบกับความเข้มแสงที่ไม่ได้ผ่านเกรตติง

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ความมุ่งหมายของการวิจัย คือ

1. เพื่อสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยใช้หลักการแทรกสอดของแสงเลเซอร์
2. เพื่อให้ได้ข้อมูลที่น่าไปประยุกต์ใช้กับการสร้างเกรตติงที่มีลักษณะเฉพาะและมีข้อจำกัดแบบโฮโลกราฟฟิกเกรตติง (Holographic Grating)
3. ได้โฮโลกราฟฟิกเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านนำไปใช้ในการทดลองเกี่ยวกับปฏิบัติการทางแสง

ความสำคัญของการวิจัย

การศึกษาเทคนิคการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยใช้หลักการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ และเทคนิคการวิเคราะห์เกี่ยวกับคุณสมบัติของเกรตติงที่มีผลต่อการเลี้ยวเบนและความเข้มของแสง ทำให้เข้าใจปัญหาที่เกิดขึ้น แนวทางแก้ไขปัญหา และข้อควรระวังที่ทำให้ผลการวิเคราะห์มีโอกาสผิดพลาดได้ ซึ่งจะเป็นข้อมูลในการพัฒนางานในส่วนของการวิเคราะห์และเทคนิคการสร้างเกรตติงต่อไป นอกจากนี้ ยังสามารถสร้างโฮโลกราฟฟิกเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านได้เองเพื่อนำไปใช้ในการทดลองเกี่ยวกับปฏิบัติการทางแสง

ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาเทคนิคการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยใช้หลักการแทรกสอดของแสง เลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีกำลัง 5 มิลลิวัตต์ และมีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร เกรตติงที่สร้างมีระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติงประมาณ 1-2 ไมโครเมตร หรือประมาณ 530–1,000 ร่องต่อมิลลิเมตร ใช้แผ่นฟิล์ม PFG-01 ซึ่งเป็นฟิล์มที่ไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร และหาระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติงโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของแสง และเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติงที่คำนวณได้จากทฤษฎี พร้อมทั้งคำนวณหาจำนวนร่องและประสิทธิภาพของเกรตติง โดยการวัดความเข้มแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงอันดับที่หนึ่ง เทียบกับความเข้มแสงที่ไม่ได้ผ่านเกรตติง

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. โฮโลกราฟฟิคเกรตติง (Holographic Grating) หมายถึง เกรตติงที่สร้างขึ้นมาจากการบันทึกการแทรกสอดของแสง ที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ (Coherent Source) ลงบนแผ่นโฟโตเรซิส (Photoresist)
2. แผ่นโฟโตเรซิส (Photoresist) หมายถึง แผ่นแก้วหรือแผ่นฟิล์มที่มีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะ
3. การตัดแต่งหน้า (Blazed) หมายถึง การตัดแต่งรูปโครงสร้างของร่องของเกรตติง เพื่อให้มีประสิทธิภาพของเกรตติงตามต้องการ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

1. การเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction)
2. การแทรกสอดของแสง (Interference)
3. เกรตติง (Grating)
4. โฮโลกราฟฟิคเกรตติง (Holographic Grating)

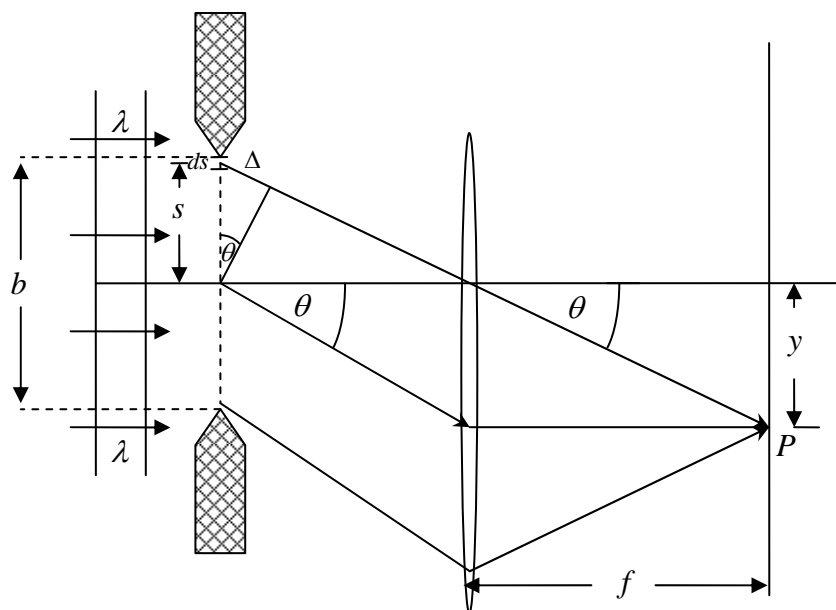
การเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction)

การเลี้ยวเบนของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านสิ่งกีดขวาง อาจเป็นเส้นลวดเล็กๆ หรือขอบกระดาษ หรือผ่านช่องแคบเล็กๆ การเลี้ยวเบนของแสงจะเกิดขึ้นให้เห็นอย่างชัดเจน ถ้าสิ่งกีดขวางหรือช่องแคบมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของแสง

การเลี้ยวเบนของแสงที่ผ่านช่องแคบเดี่ยว (Single Slit)

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการเลี้ยวเบนแบบเฟรอนโฮเฟอร์ ที่เกิดจากการที่แสงผ่านช่องแคบเดี่ยวที่มีความกว้างแน่นอนค่าหนึ่ง

การเลี้ยวเบนแบบเฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer Diffraction) เกิดขึ้นเมื่อคลื่นระนาบตกตั้งฉากกับช่องแคบเดี่ยว จะทำให้เกิดเป็นแถบมืดแถบสว่างขึ้นที่ระยะอนันต์ ในทางปฏิบัติจะใช้เลนส์รวมแสงให้ภาพไปตกบนฉากพอดี โดยมี f เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์ ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แสดงการเลี้ยวเบนแบบเฟราน์โฮเฟอร์ซึ่งมีเลนส์ช่วยทำให้เกิดภาพบนฉาก

ที่มา: Frank L. Pedrotti; & Leno S. Pedrotti. (1993). *Introduction to optics*.

p. 325.

เมื่อคลื่นแสงเคลื่อนที่มาถึงช่องแคบเดี่ยวซึ่งมีความกว้างของช่องเปิด b ตามหลักการของฮอยเกนส์ (Huygen's Principle) ถือได้ว่าทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นนั้นเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นชุดใหม่ที่มีเฟสตรงกัน แสงจากจุดกำเนิดเหล่านี้ เมื่อไปกระทบฉากก็จะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือหักล้างกัน ขึ้นกับผลต่างของระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ไปถึงฉาก ดังภาพประกอบ 2

ถ้าแบ่งช่องแคบออกเป็น 2 ส่วน กว้างส่วนละ $\frac{b}{2}$ หรือแทนด้วย s ลำแสงขนานจากช่องแคบจะมีผลต่างของทางเดินเป็น Δ ซึ่งคือ $s \sin \theta$ โดยที่ θ คือมุมที่ลำแสงเบนออกจากแนวเดิม แถบมืดบนฉากจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\Delta = s \sin \theta = \frac{b}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$

หรือ

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{b} \quad (1)$$

ถ้าแบ่งช่องแคบออกเป็น 4 ส่วน, 6 ส่วน, 8 ส่วน และ 10 ส่วน แถบมืดบนฉากจะเกิดขึ้นเมื่อ

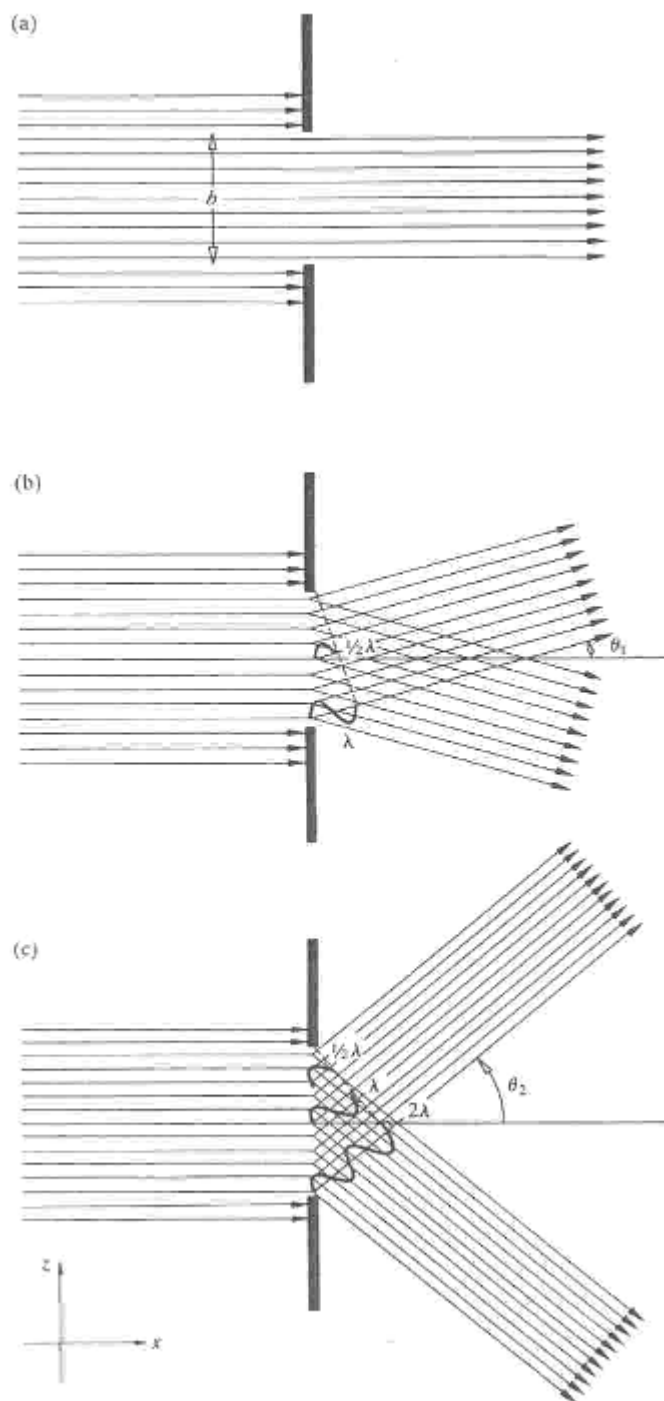
$$\sin \theta = \frac{2\lambda}{b}, \frac{3\lambda}{b}, \frac{4\lambda}{b}, \frac{5\lambda}{b}, \dots$$

ซึ่งเขียนเป็นสมการของการเกิดแถบมืดได้เป็น

$$b \sin \theta = n\lambda \quad (2)$$

เมื่อ

$$n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$



ภาพประกอบ 2 แสดงการเลี้ยวเบนของแสงในทิศทางที่ต่างกัน (a) แสงไม่เกิดการเลี้ยวเบน เป็นจุดสว่าง (b) และ (c) ความแตกต่างของวิถีของแสง ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันได้เป็นแถบมืดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ที่มา: Eugene Hecht. (2002). *Optics*. p. 455.

ความเข้มแสงจากการเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องแคบเดี่ยว

เพดรอทตี (Pedrotti. 1993: 325-327) ได้เขียนถึงความเข้มแสงจากการเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องแคบเดี่ยวแบบเฟราน์โฮเฟอร์ (Fraunhofer Diffraction) ว่า ค่าของสนามไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดทุกแหล่งในช่วงความกว้างของช่องแคบ b ที่จุด P ตามภาพประกอบ 1 เขียนได้เป็น

$$dE_p = \left(\frac{dE_0}{r} \right) e^{i(kr - \omega t)} \quad (3)$$

เมื่อ

dE_p คือ ค่าของสนามไฟฟ้าที่จุด P อันเนื่องมาจากคลื่นย่อยที่แหล่งกำเนิด ds

dE_0 คือ แอมพลิจูดของคลื่นย่อยที่ออกมาจาก ds

k คือ เลขคลื่น (Wave Number)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency)

และ r คือ ระยะจาก ds ไปจุด P ให้แต่ละระยะของ ds เป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นลูกใหม่ตามหลักของฮอยเกนส์ ถ้า r มากขึ้น แอมพลิจูดจะลดลง นั่นคือ $E^2 \propto 1/r^2$ และ

$$E \propto 1/r$$

เนื่องจากคลื่นแต่ละส่วนเล็กๆ ds ที่เคลื่อนที่ไปยังจุด P มีระยะทางเดินที่แตกต่างกัน เมื่อนำผลต่างของทางเดินมาพิจารณา จะทำให้ได้สนามไฟฟ้าที่จุด P เป็น

$$dE_p = \left(\frac{dE_0}{r} \right) e^{i[k(r_0 + \Delta) - \omega t]} \quad (4)$$

เมื่อแสงเกิดการแทรกสอดที่จุด P ด้วยมุมที่เบนออกจากแนวกลางเป็น θ มีผลทำให้ผลต่างของทางเดินเป็น $\Delta = s \sin \theta$ ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$dE_P = \left(\frac{E_L ds}{r_0} \right) e^{i(kr_0 + ks \sin \theta - \omega t)} \quad (5)$$

เมื่อ E_L เป็นแอมพลิจูดต่อหน่วยความกว้างของช่องแคบ และ r_0 เป็นระยะทางจากจุดกึ่งกลางของช่องแคบไปยังจุด P จะได้แอมพลิจูดตลอดความกว้างของช่องแคบเป็น

$$E_P = \left(\frac{E_L}{r_0} \int_{-b/2}^{b/2} e^{iks \sin \theta} ds \right) e^{i(kr_0 - \omega t)} \quad (6)$$

จากความเข้มของแสง ขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าลัทธิกำลังสอง เมื่อแทนแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าลัทธิด้วย E_R จะได้

$$E_R = \frac{E_L}{r_0} \left(\frac{e^{iks \sin \theta}}{ik \sin \theta} \right)_{-b/2}^{b/2} \quad (7)$$

$$E_R = \frac{E_L}{r_0} \frac{1}{ik \sin \theta} \left[e^{(ikb \sin \theta)/2} - e^{-(ikb \sin \theta)/2} \right] \quad (8)$$

เนื่องจาก

$$\beta \equiv \frac{1}{2} kb \sin \theta$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$E_R = \frac{E_L b}{r_0 2i\beta} (e^{i\beta} - e^{-i\beta})$$

ใช้สมการของออยเลอร์ (Euler's Equation)

$$\sin \beta = \frac{e^{i\beta} - e^{-i\beta}}{2i}$$

ทำให้ได้

$$E_R = \frac{E_L b}{r_0 2i\beta} (2i \sin \beta) \quad (9)$$

$$E_R = \frac{E_L b \sin \beta}{r_0 \beta} \quad (10)$$

เมื่อ β คือ ความต่างเฟส (Phase Difference) ของสนามไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่ง β จะเปลี่ยนแปลงตาม θ ดังภาพประกอบ 3

เนื่องจาก

$$I \propto E_R^2$$

จะได้

$$\begin{aligned} I &= \left(\frac{\epsilon_0 c}{2} \right) E_R^2 \\ &= \frac{\epsilon_0 c}{2} \left(\frac{E_L b}{r_0} \right)^2 \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \\ &= I_0 \left(\frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ สภาพยอม (Permittivity) ทางไฟฟ้าในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 8.8542×10^{-12} (คูลอมบ์)² ต่อนิวตัน-เมตร² และ c คือ อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ

โดยที่

$$\lim_{\beta \rightarrow 0} \sin c(\beta) = \lim_{\beta \rightarrow 0} \frac{\sin \beta}{\beta} = 1$$

จะได้

$$I \equiv I_0 \sin^2 c(\beta) \quad (12)$$

ในกรณีที่ θ เป็นมุมน้อยๆ

$$\sin \theta \cong y / f$$

จะได้สมการของความเข้มเป็น

$$I = \frac{I_0 \sin^2(\pi b y / \lambda f)}{(\pi b y / \lambda f)^2} \quad (13)$$

เมื่อ

b คือ ความกว้างของช่องแคบ

y คือ ระยะทางที่ห่างจากแนวกลาง

λ คือ ความยาวคลื่นแสง

f คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์

ระหว่างแถบมืดจะมีแถบสว่าง และตรงตำแหน่งที่ $\sin \theta = 0$ จะเป็นแถบสว่างกลาง (Central Bright Fringe) ที่มีความกว้างเป็นสองเท่าของแถบสว่างอันดับอื่นๆ และมีความเข้มสูงสุด ส่วนแถบสว่างอันดับอื่นๆ ความเข้มจะค่อยๆ ลดลง ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 3 ถ้าไม่ใช้เลนส์รวมแสง ภาพลวดลายการเลี้ยวเบนจะเกิดที่ระยะไกลมาก มุมเบี่ยงเบน θ จึงเป็นมุมเล็กมาก ดังนั้น $\sin \theta \cong \tan \theta$

จะได้

$$\sin \theta_1 \cong \tan \theta_1 = \frac{y_1}{L} = \frac{\lambda}{b}$$

และ

$$\sin \theta_2 \cong \tan \theta_2 = \frac{y_2}{L} = 2 \frac{\lambda}{b}$$

จะได้

$$y_1 = \frac{L\lambda}{b}, \quad y_2 = 2 \frac{L\lambda}{b}$$

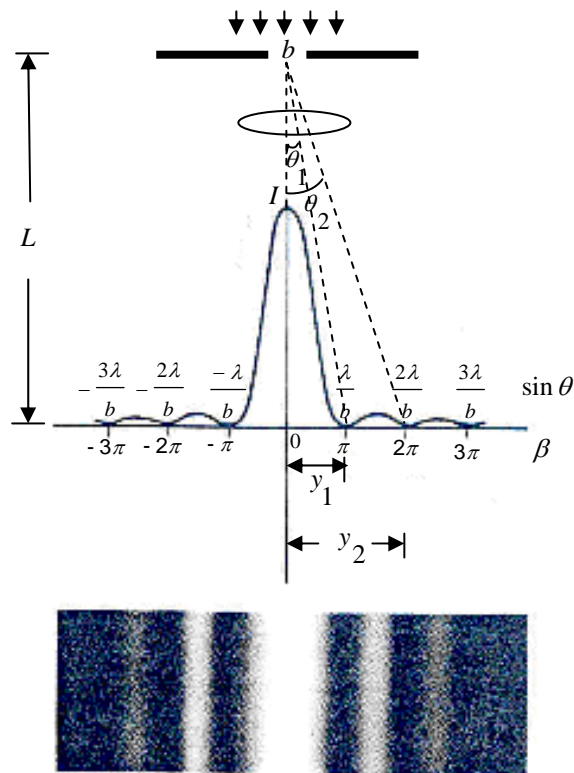
ดังนั้น

$$y_2 - y_1 = 2 \frac{L\lambda}{b} - \frac{L\lambda}{b} = \frac{L\lambda}{b} \quad (14)$$

เมื่อ

- $y_2 - y_1$ คือ แถบสว่างอันดับที่ 1
- L คือ ระยะจากฉากถึงช่องแคบเดี่ยว
- λ คือ ความยาวคลื่นแสง
- b คือ ความกว้างของช่องแคบเดี่ยว

เมื่อ $y_2 - y_1$ คือ แถบสว่างอันดับที่ 1 ซึ่งเท่ากับ $y_3 - y_2, y_4 - y_3, \dots = \frac{L\lambda}{b}$ และเนื่องจากความกว้างของแถบสว่างกลางเท่ากับ $2y_1 = 2 \frac{L\lambda}{b}$ นั่นคือ ความกว้างของแถบสว่างกลางเป็นสองเท่าของแถบสว่างอันดับอื่นๆ



ภาพประกอบ 3 กราฟความเข้มแสงที่สัมพันธ์กับลวดลายการเลี้ยวเบนเมื่อแสงผ่านช่องแคบเดี่ยว

ที่มา: Francis Weston Sears. (1964). *Optics*. p. 231.

การแทรกสอดของแสง (Interference)

การแทรกสอด (Interference) เป็นสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งของคลื่น เกิดขึ้นเมื่อคลื่นสองขบวนหรือมากกว่ามาพบกันที่จุดเดียว เกิดการรวมกันแบบเสริมและแบบหักล้างกัน

แหล่งกำเนิดแสงทั่วไปที่พบในชีวิตประจำวันจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ไม่มีความยาวคลื่นหลายค่า เช่น แสงขาว การแทรกสอดของคลื่นที่เกิดจากการรวมคลื่นจะมองเห็นได้ไม่ชัดเจน เพราะเฟสของคลื่นไม่เป็นระเบียบ ผลรวมของคลื่นจึงไม่เป็นระเบียบตามไปด้วย ผลการแทรกสอดของคลื่นที่จุดๆหนึ่งจะเปลี่ยนไปไม่คงที่ ถ้าเกิดขึ้นให้เห็นเป็นเวลาที่น้อยกว่า 10^{-8} วินาทีแล้ว สายตามนุษย์จะไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ ดังนั้น ในการทดลองเกี่ยวกับการแทรกสอดของแสงจะมองเห็นผลของการแทรกสอดของแสงได้ ขึ้นอยู่กับกรณีต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดแสงต้องเป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ (Coherent) หมายความว่า แสงแต่ละคลื่นแสงจะต้องมีเฟสคงที่ หรือเฟสต่างกันคงที่ เคลื่อนที่โดยมีเฟสที่ตรงกัน คลื่นทุกๆ คลื่นจะมีเฟสตรงกันตลอดเวลาตั้งภาพประกอบ 4

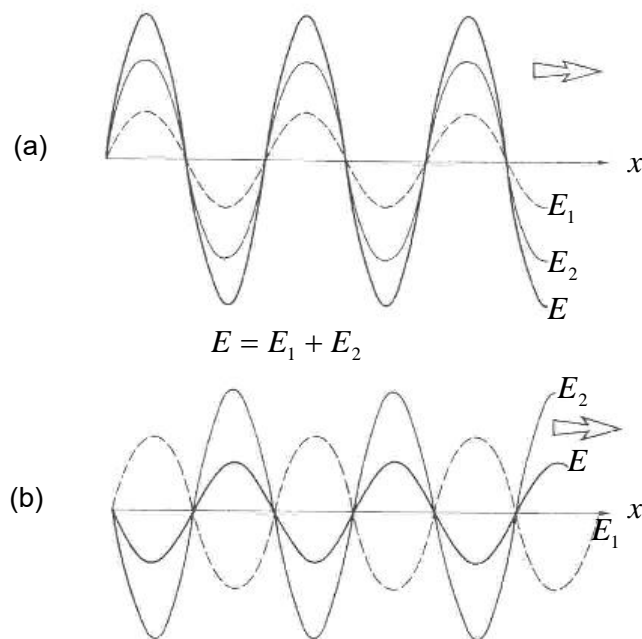


ภาพประกอบ 4 แสดงสมบัติอาพันธ์ของคลื่นแสง

ที่มา: สุรพล รักรวิชัย. (2544). เลเซอร์ทัศนวิสัยและการประยุกต์. หน้า 93.

2. แหล่งกำเนิดแสงต้องเป็นแสงสีเดียว (Monochromatic) มีความยาวคลื่นเดียว และมีความถี่เดียว ได้แก่ แสงเลเซอร์

3. การแทรกสอดจะสอดคล้องกับหลักการซ้อนทับกันของคลื่น (Superposition Principle) เมื่อคลื่นตั้งแต่สองคลื่นเคลื่อนที่มา ณ ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน คลื่นลัพธ์จะมีการกระจัดที่ตำแหน่งนั้นเท่ากับผลรวมของการกระจัดของคลื่นทุกคลื่นที่ตำแหน่งนั้น หลังจากนั้นคลื่นแต่ละคลื่นจะแยกห่างจากกันไปตามทิศทางเดิมของแต่ละคลื่น และแต่ละคลื่นยังมีรูปร่างเช่นเดิม ถ้าผลของการซ้อนทับกันของคลื่นทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลัพธ์ที่ตำแหน่งนั้นเพิ่มขึ้นเรียกว่า การแทรกสอดแบบเสริม (Constructive Interference) ถ้าคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงข้ามกัน ผลของการซ้อนทับกันของคลื่นจะทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลัพธ์ที่ตำแหน่งนั้นลดลง เรียกว่า การแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive Interference) ตั้งภาพประกอบ 5 ให้ E_1 เป็นคลื่นที่ 1, E_2 เป็นคลื่นที่ 2 และ E เป็นคลื่นลัพธ์ คลื่นเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแกน x

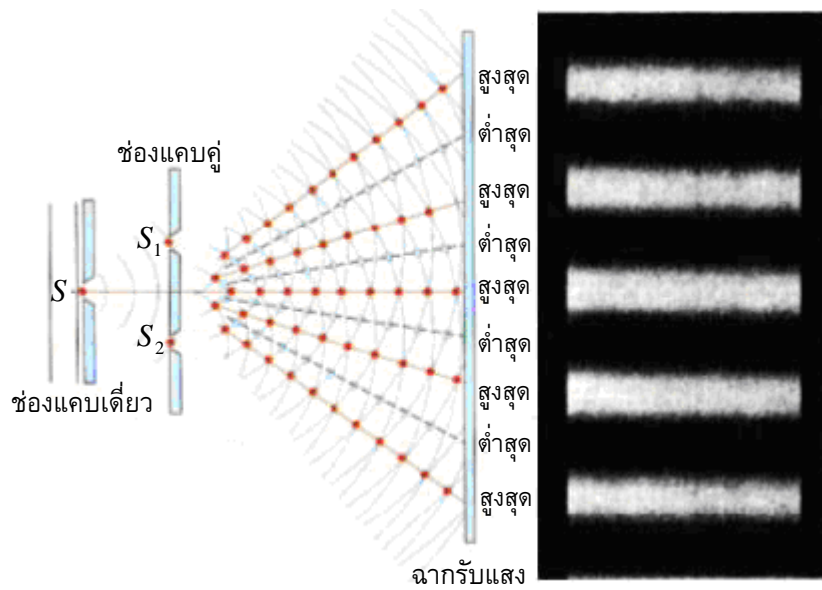


ภาพประกอบ 5 แสดงหลักการซ้อนทับของคลื่น 2 คลื่น (a) ที่มีเฟสตรงกัน และ (b) เฟสตรงข้าม

ที่มา: Eugene Hecht. (2002). *Optics*. p. 283.

การแทรกสอดของแสงที่ผ่านช่องแคบคู่ (Double Slit)

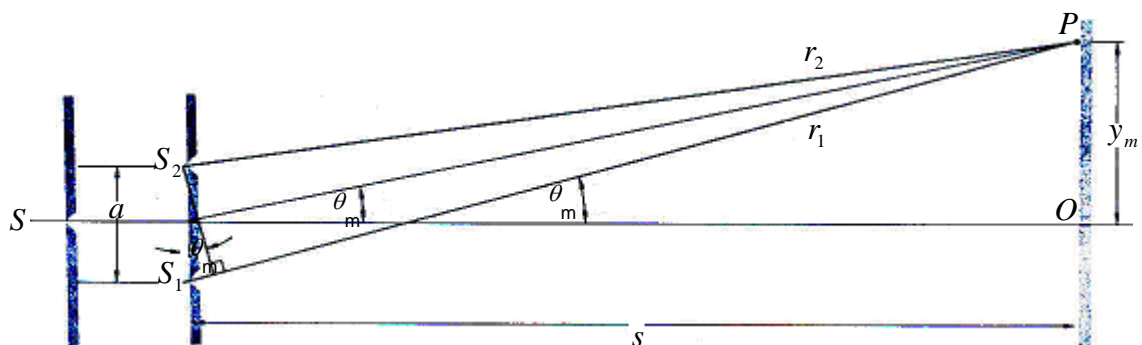
ในปี ค.ศ. 1800 โทมัส ยัง (Thomas Young) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษได้ทดลองให้เห็นว่าคลื่นแสงสามารถแทรกสอดกันได้ ดังภาพประกอบ 6 เมื่อให้แสงความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic Light) ผ่านช่องแคบขนาดเล็กมากๆ S คลื่นแสงจะแผ่ออกมาเป็นหน้าคลื่นทรงกลมซึ่งเป็นไปตามหลักการของฮอยเกนส์ (Huygen's Principle) เมื่อแสงที่มีหน้าคลื่นเดียวกันไป ตกกระทบยังช่องแคบๆ S_1 และ S_2 อาจถือว่า S_1 และ S_2 เป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ ให้แสงไปเกิดการแทรกสอดบนฉาก เป็นแถบสว่างและแถบมืดสลับกัน ตำแหน่งที่คลื่นแสงสองคลื่นนั้นมีเฟสตรงกันจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (Constructive Interference) จะปรากฏเป็นแถบสว่างบนฉาก ถ้ามีเฟสต่างกันจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive Interference) จะปรากฏเป็นแถบมืดบนฉาก



ภาพประกอบ 6 แสดงการแทรกสอดของแสงจากการทดลองของยัง

ที่มา: Richard Fitzpatrick. (2003). *Electromagnetism and Optics*. (Online).

เมื่อเขียนการแทรกสอดของแสงจากการทดลองของยัง เพื่อหาค่าผลต่างของทางเดินแสง (Path Difference) แทนด้วย Δ ได้ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 แสดงวิถีของแสงเมื่อผ่านช่องแคบคู่จากการทดลองของยัง

ที่มา: Eugene Hecht. (2002). *Optics*. p. 394.

พิจารณาการแทรกสอดของแสงที่จุด P ใดๆ บนฉาก ถ้าแสงจากแหล่งกำเนิดทั้งสองมีความแตกต่างของทางเดินเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (Constructive Interference) ที่จุด P บนฉาก ได้เป็นแถบสว่าง ดังภาพประกอบ 8 ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

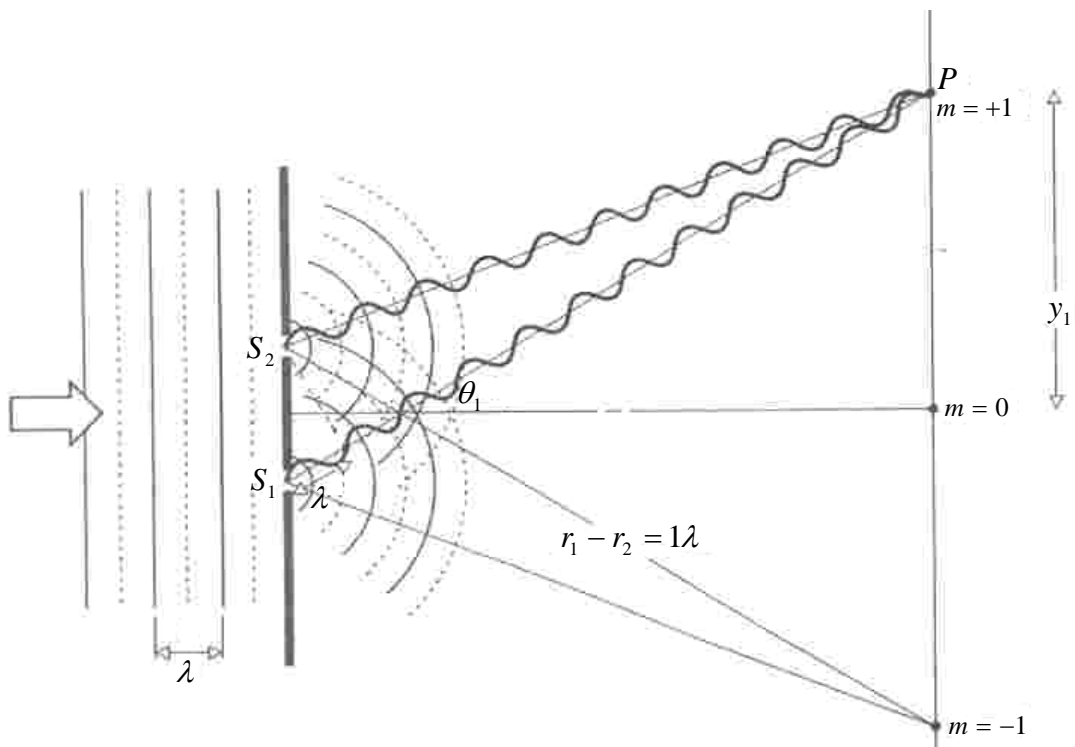
$$\text{การแทรกสอดแบบเสริม ; แถบสว่าง : } r_1 - r_2 = \Delta = m\lambda = a \sin \theta \quad (15)$$

$$\text{เมื่อ } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

ถ้าแสงจากแหล่งกำเนิดทั้งสองมีความแตกต่างของทางเดินเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive Interference) ที่จุด P บนฉาก ได้เป็นแถบมืด ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\text{การแทรกสอดแบบหักล้าง ; แถบมืด : } r_1 - r_2 = \Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = a \sin \theta \quad (16)$$

$$\text{เมื่อ } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



ภาพประกอบ 8 แสดงการแทรกสอดแบบเสริมเมื่อแสงผ่านช่องแคบคู่จากการทดลองของยัง

ที่มา: Eugene Hecht. (2002). *Optics*. p. 395.

จากภาพประกอบ 7 การหาระยะทางจากแถบสว่างตรงกลาง (O) ถึงแถบสว่างอันดับที่ m (คือ y_m) หาได้จาก

$$y_m = s \sin \theta \cong s \tan \theta$$

เนื่องจาก θ เป็นมุมเล็กๆ ดังนั้น $\sin \theta \cong \tan \theta$ และจากสมการ (15) จะได้

$$y_m = \left(\frac{s}{a}\right)m\lambda \quad (17)$$

เมื่อ

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

ระยะห่างระหว่างแถบสว่างสองแถบที่อยู่ติดกันแทนด้วย Δy หาได้จาก

$$\Delta y = \left(\frac{s}{a}\right)\lambda \quad (18)$$

จากสมการ (15) จะเป็นสมการที่แสดงจุดกึ่งกลางของแถบสว่าง โดยมีความเข้มของแสงสูงสุดเมื่อ $a \frac{\sin \theta}{\lambda} = m$ ส่วนสมการ (16) เป็นสมการที่แสดงจุดกึ่งกลางของแถบมืด และมีความเข้มของแสงต่ำสุดเมื่อ $\left(\frac{a \sin \theta}{\lambda^2} - \frac{1}{2}\right)\lambda = m$

ความเข้มแสงจากการแทรกสอดของแสงผ่านช่องแคบคู่

เพดรอทตี (Pedrotti. 1993: 200-204) ได้เขียนถึงความเข้มแสงจากการแทรกสอดของแสงผ่านช่องแคบคู่ในการทดลองของยัง โดยพิจารณาการแทรกสอดของคลื่น 2 คลื่น ที่มีความถี่เดียวกัน โดย \mathbf{E}_1 และ \mathbf{E}_2 แทนสนามไฟฟ้า (Electric Field) เขียนสมการได้เป็น

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_{01} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_1) \quad (19)$$

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_{02} \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_2) \quad (20)$$

เมื่อ

\mathbf{k}_1 และ \mathbf{k}_2 เป็นเวกเตอร์คลื่น (Propagation Vector)

\mathbf{r} คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดใดๆ ในสนามไฟฟ้า

ω คือ ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency)

ε_1 และ ε_2 คือ เฟสเริ่มต้นของคลื่นจากแหล่งกำเนิด S_1 และ S_2

เมื่อคลื่นทั้งสองไปพบกันที่จุด P จะเกิดการซ้อนทับกันตามหลักการซ้อนทับ (Principle of Superposition) ของคลื่น เขียนได้เป็น

$$\mathbf{E}_P = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$$

โดย \mathbf{E}_P คือ สนามไฟฟ้าที่จุด P

หาความเข้มแสงจาก

$$I = \varepsilon_0 c \langle \mathbf{E}^2 \rangle \quad (21)$$

เมื่อ ε_0 คือ สภาพยอม (Permittivity) ทางไฟฟ้าในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 8.8542×10^{-12} (คูลอมบ์)² ต่อวัตตัน-เมตร²
 c คือ อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ
 $\langle \mathbf{E}^2 \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ากำลังสอง

พิจารณาคความเข้มแสงที่จุด P จะได้

$$\begin{aligned} I &= \varepsilon_0 c \langle \mathbf{E}_P^2 \rangle \\ &= \varepsilon_0 c \langle \mathbf{E}_P \cdot \mathbf{E}_P \rangle \\ &= \varepsilon_0 c \langle (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \rangle \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$I = \varepsilon_0 c \langle \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle \quad (22)$$

จากสมการ (21) ให้เทอมที่ 1 เป็น I_1 และเทอมที่ 2 เป็น I_2 ส่วนเทอมที่ 3 จะเป็นเทอมของการแทรกสอด (Interference Term) จะให้เป็น I_{12} จะได้

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (23)$$

พิจารณาเทอมของการแทรกสอดได้เป็น

$$I_{12} = 2\varepsilon_0 c \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle \quad (24)$$

เมื่อ

$$\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_1) \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varepsilon_2)$$

ถ้ากำหนดให้

$$\alpha \equiv \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_1$$

และ

$$\beta \equiv \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \varepsilon_2$$

ดังนั้นจะได้

$$\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos(\alpha - \omega t) \cos(\beta - \omega t)$$

โดย

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle &= \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \left[\cos \alpha \cos \beta \langle \cos^2 \omega t \rangle + \sin \alpha \sin \beta \langle \sin^2 \omega t \rangle \right. \\ &\quad \left. + (\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta) \langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle \right] \end{aligned}$$

เมื่อค่ากำลังสองเฉลี่ย คือ

$$\langle \cos^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}$$

$$\langle \sin^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}$$

และ

$$\langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle = 0$$

ดังนั้น

$$\langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle = \frac{1}{2} \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos(\alpha - \beta) \quad (25)$$

หรือ

$$\langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle = \frac{1}{2} \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)] \quad (26)$$

ดังนั้นจะได้ความแตกต่างเฟส (Phase Difference) ระหว่าง \mathbf{E}_1 และ \mathbf{E}_2 ในสมการ (19) และ (20) เป็น

$$\delta = (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (27)$$

รวมสมการ (24) , (26) และ (27) จะได้

$$I_{12} = \varepsilon_0 c \mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos \delta \quad (28)$$

พิจารณาความเข้ม I_1 และ I_2 ของสมการ (23) สามารถเขียนได้เป็น

$$I_1 = \varepsilon_0 c \langle \mathbf{E}_1^2 \rangle \quad (29)$$

$$I_1 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c \langle \mathbf{E}_{01}^2 \rangle$$

และ

$$I_2 = \varepsilon_0 c \langle \mathbf{E}_2^2 \rangle \quad (30)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c \langle \mathbf{E}_{02}^2 \rangle$$

ในกรณีที่ \mathbf{E}_{01} ขนาน \mathbf{E}_{02} ผลคูณสเกลาร์ในสมการ (28) จะมีค่าเท่ากับผลคูณของขนาดของ \mathbf{E}_{01} และ \mathbf{E}_{02} จะได้

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (31)$$

ซึ่งจะได้

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (32)$$

เมื่อ $\cos \delta = +1$ จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม และได้ค่าความเข้มสูงสุด คือ

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (33)$$

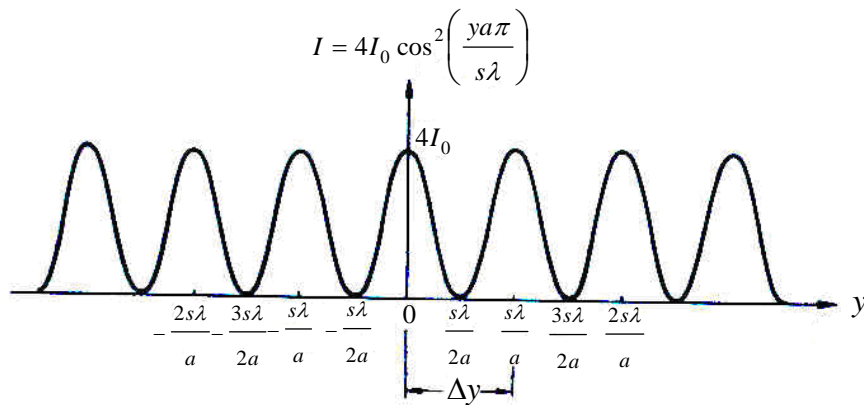
โดยความต่างเฟส $\delta = 2m\pi$ เมื่อ $m = 0, 1, 2, \dots$

เมื่อ $\cos \delta = -1$ จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง และได้ความเข้มน้อยที่สุด

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (34)$$

โดยความต่างเฟส $\delta = (2m+1)\pi$

กรณีความเข้ม $I_1 = I_2 = I_0$ จะได้กราฟ ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 แสดงการกระจายความเข้มแสงในลวดลายการแทรกสอดจากการทดลองของยัง

ที่มา: Eugene Hecht. (2002). *Optics*. p. 396.

ซึ่งมีค่าความเข้มสูงสุดเป็น

$$I_{\max} = 4I_0$$

และความเข้มต่ำสุดเป็น

$$I_{\min} = 0$$

ในการทดลองให้ลำแสงที่มาแทรกสอดกันนั้นมีแอมพลิจูดเท่ากัน เราจะหาความเข้มได้เป็น

$$\begin{aligned} I &= I_0 + I_0 + 2\sqrt{I_0^2} \cos \delta \\ &= 2I_0(1 + \cos \delta) \end{aligned}$$

เนื่องจาก

$$1 + \cos \delta \equiv 2 \cos^2 \left(\frac{\delta}{2} \right)$$

จะได้ความเข้มของการแทรกสอดของแสงเป็น

$$I = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\delta}{2} \right)$$

และในกรณีที่ θ เป็นมุมน้อยๆ

$$\frac{\delta}{2} = \frac{\pi a y}{\lambda s}$$

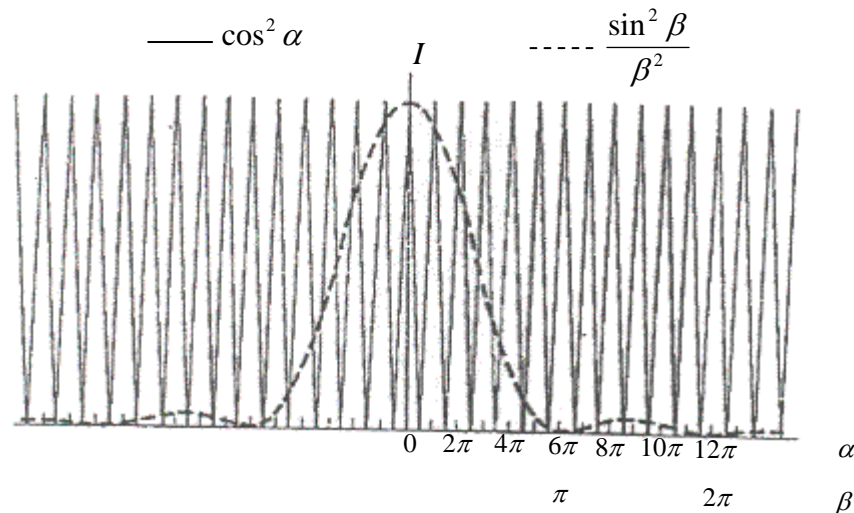
เพราะฉะนั้นจะได้

$$I = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi a y}{\lambda s} \right) \quad (35)$$

เมื่อ

- a คือ ระยะห่างระหว่างช่องแคบ
- y คือ ระยะทางที่ห่างจากแนวกลาง
- λ คือ ความยาวคลื่นแสง
- s คือ ระยะห่างระหว่างช่องแคบกับฉาก

จากการแทรกสอดของแสงที่ได้กล่าวมาข้างต้น เราจะไม่ได้คิดความกว้างของช่องแคบ จึงไม่ได้คิดถึงผลของการเลี้ยวเบน ความเข้มแสงที่ได้จึงเป็นความเข้มจากการแทรกสอดเท่านั้น ในกรณีที่เรพิจารณาความกว้างของช่องแคบความเข้มแสงที่เกิดขึ้นจะได้มาจากการเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องแคบด้วย ดังนั้นความเข้มแสงที่เกิดขึ้นจะเป็นความเข้มรวมจากการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 กราฟแสดงความเข้มแสงจากการแทรกสอดของแสงผ่านช่องแคบคู่ซึ่งประกอบด้วยความเข้มแสงจากการแทรกสอด — และความเข้มแสงจากการเลี้ยวเบน - - -

ที่มา: Frank L. Pedrotti; & Leno S. Pedrotti. (1993). *Introduction to optics*. p. 340.

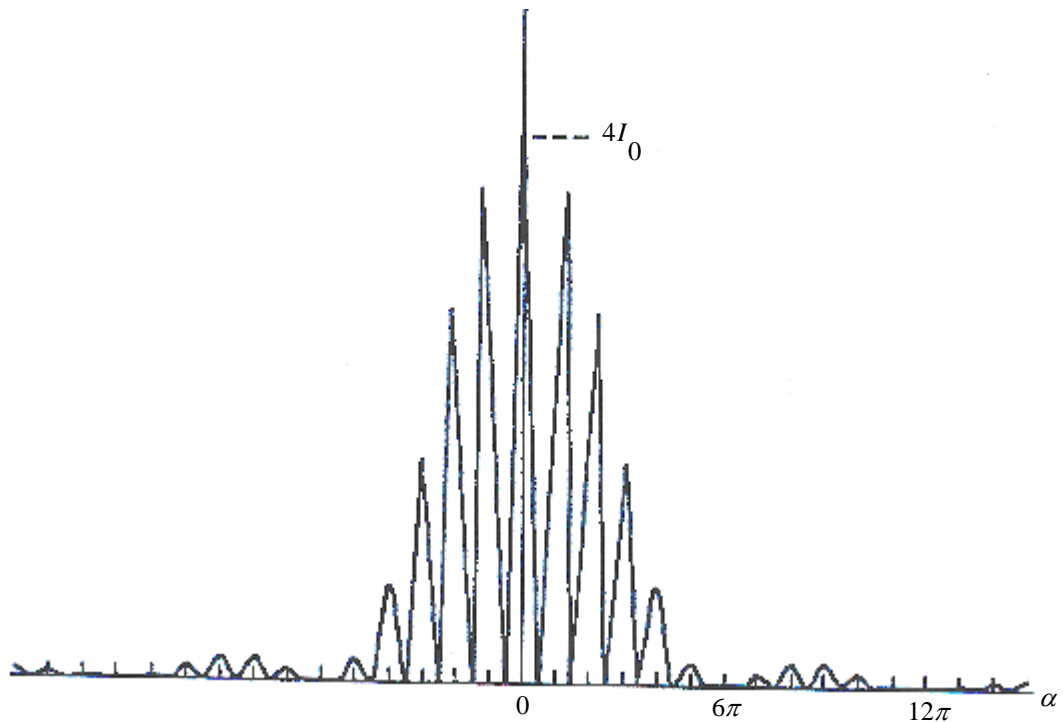
ทำให้ได้ค่าความเข้มรวมเป็นดังสมการ

$$I = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi a y}{\lambda s} \right) \cdot \frac{\sin^2 (\pi b y / \lambda s)}{(\pi b y / \lambda s)^2} \quad (36)$$

เมื่อ

- a คือ ระยะห่างระหว่างช่องแคบ
- y คือ ระยะทางที่ห่างจากแนวกลาง
- λ คือ ความยาวคลื่นแสง
- s คือ ระยะห่างระหว่างช่องแคบกับฉาก
- b คือ ความกว้างของช่องแคบ

ในกรณีที่ค่าสูงสุดของการแทรกสอด (Interference Maximum) ตรงกับค่าต่ำสุดของการเลี้ยวเบน (Diffraction Minimum) ผลของการเลี้ยวเบนจะกีดผลของการแทรกสอดทำให้แถบสว่างของการแทรกสอด ณ ตำแหน่งนั้นหายไป แสดงดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 กราฟแสดงความเข้มรวมของการแทรกสอดของแสงผ่านช่องแคบคู่

ที่มา: Frank L. Pedrotti; & Leno S. Pedrotti. (1993). *Introduction to optics*.
p. 340.

เนื่องจาก ค่าต่ำสุดของการเลี้ยวเบน จากสมการ (2) คือ

$$n\lambda = b \sin \theta$$

และค่าสูงสุดของการแทรกสอด จากสมการ (15) คือ

$$m\lambda = a \sin \theta$$

ดังนั้น อันดับของแถบสว่างที่หายไปจะหาได้จาก

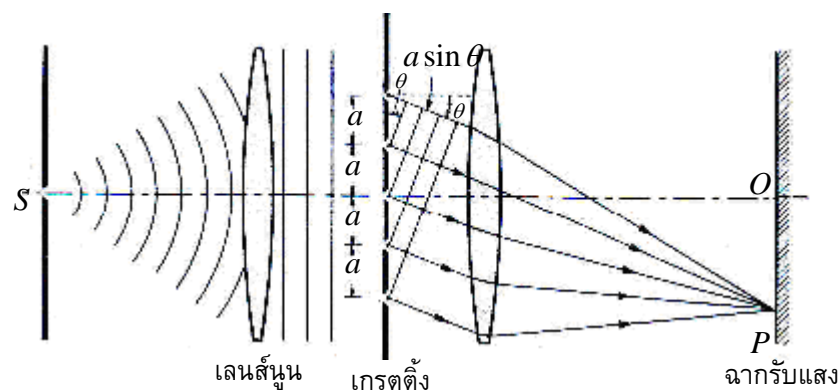
$$\frac{m\lambda}{n\lambda} = \frac{a \sin \theta}{b \sin \theta}$$

$$m = \left(\frac{a}{b}\right)n \quad (37)$$

เมื่อ m คือ อันดับของการแทรกสอด มีค่า $0, \pm 1, \pm 2, \dots$
 n คือ อันดับของการเลี้ยวเบน มีค่า $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

การแทรกสอดของแสงที่ผ่านช่องแคบยาวหลายช่อง (Multiple Slit)

การแทรกสอดของคลื่นจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์ พิจารณากรณีแหล่งกำเนิดคลื่นหลายแหล่งวางห่างกันเป็นระยะเท่าๆ กัน เท่ากับ a ดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 แสดงการแทรกสอดของแสงเมื่อผ่านแหล่งกำเนิดอาพันธ์หลายแหล่ง

ที่มา: Francis Weston Sears. (1964). *Optics*. p. 217.

รังสีของแสงที่อยู่ติดกันแต่ละคู่จะมีความต่างเฟส (Phase Difference) เป็นค่าคงที่ดังสมการ (38) ผลต่างของเฟส (δ) จะขึ้นอยู่กับผลต่างของทางเดินแสง (Δ) ถ้าผลต่างของทางเดินแสงเป็น $\frac{\lambda}{2}$ จะมีผลต่างเฟสเท่ากับ π และถ้าผลต่างของทางเดินแสงเป็น λ จะมีผลต่างเฟสเท่ากับ 2π

จะได้
$$\frac{\delta}{2\pi} = \frac{\Delta}{\lambda}$$

เมื่อ
$$\Delta = r_1 - r_2$$

แทนค่า
$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) \quad (38)$$

เมื่อ
$$\frac{2\pi}{\lambda}$$
 เป็นเลขคลื่น (Wave Number)

จากสมการ (15) หรือ (16) จะได้

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta \quad (39)$$

จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันเมื่อ

$$\delta = 2m\pi \quad (40)$$

และเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันเมื่อ

$$\delta = (2m + 1)\pi \quad (41)$$

เมื่อ

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

ความเข้มของคลื่นรวม (I) จะเป็นความเข้มสูงสุดเหมือนกับความเข้มรวมของการแทรกสอดของแสงผ่านช่องแคบคู่ตั้งที่ได้กล่าวมาข้างต้น ดังภาพประกอบ 13

ในกรณีที่

$$I_1 = I_2 = I_N = I_0$$

หาความเข้มแสงจากสมการ (21)

$$I = \varepsilon_0 c \langle \mathbf{E}^2 \rangle$$

กรณีที่มีสนามไฟฟ้า N แหล่ง คือ $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3, \dots, \mathbf{E}_N$

จะได้

$$\begin{aligned} I &= \varepsilon_0 c \langle (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \mathbf{E}_4 + \dots + \mathbf{E}_{N-1} + \mathbf{E}_N) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \mathbf{E}_4 + \dots + \mathbf{E}_{N-1} + \mathbf{E}_N) \rangle \\ &= \varepsilon_0 c \langle (\mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + \mathbf{E}_3^2 + \dots + \mathbf{E}_N^2) + (2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_3 + \dots + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_N) \\ &\quad + (2\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_3 + 2\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_4 + \dots + 2\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_N) + (2\mathbf{E}_3 \cdot \mathbf{E}_4 + 2\mathbf{E}_3 \cdot \mathbf{E}_5 + \dots + 2\mathbf{E}_5 \cdot \mathbf{E}_N) \\ &\quad + \dots + 2(\mathbf{E}_{N-1} \cdot \mathbf{E}_N) \rangle \\ &= \langle (I_1 + I_2 + \dots + I_N) + 2(I_{12} + I_{13} + \dots + I_{1N}) + 2(I_{23} + I_{24} + I_{25} + \dots + I_{2N}) \\ &\quad + \dots + 2I_{(N-1)N} \rangle \end{aligned}$$

เนื่องจาก I เท่ากันหมด $= I_0$

จะได้

$$\begin{aligned} I &= NI_0 + 2(N-1)I_0 + 2(N-2)I_0 + 2(N-3)I_0 + \dots + 2I_0(N-(N-1)) \\ &= NI_0 + 2I_0[N-1+N-2+N-3+\dots+N-(N-1)] \\ &= NI_0 + 2I[(N+N+N+\dots+N)-(1+2+3+\dots+N)] \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$\begin{aligned} I &= NI_0 + 2I_0\left(N^2 - \frac{N}{2}(N+1)\right) \\ &= NI_0 + 2I_0N^2 - NI_0(N+1) \\ &= NI_0 + 2I_0N^2 - I_0N^2 - NI_0 \\ &= N^2I_0 \end{aligned}$$

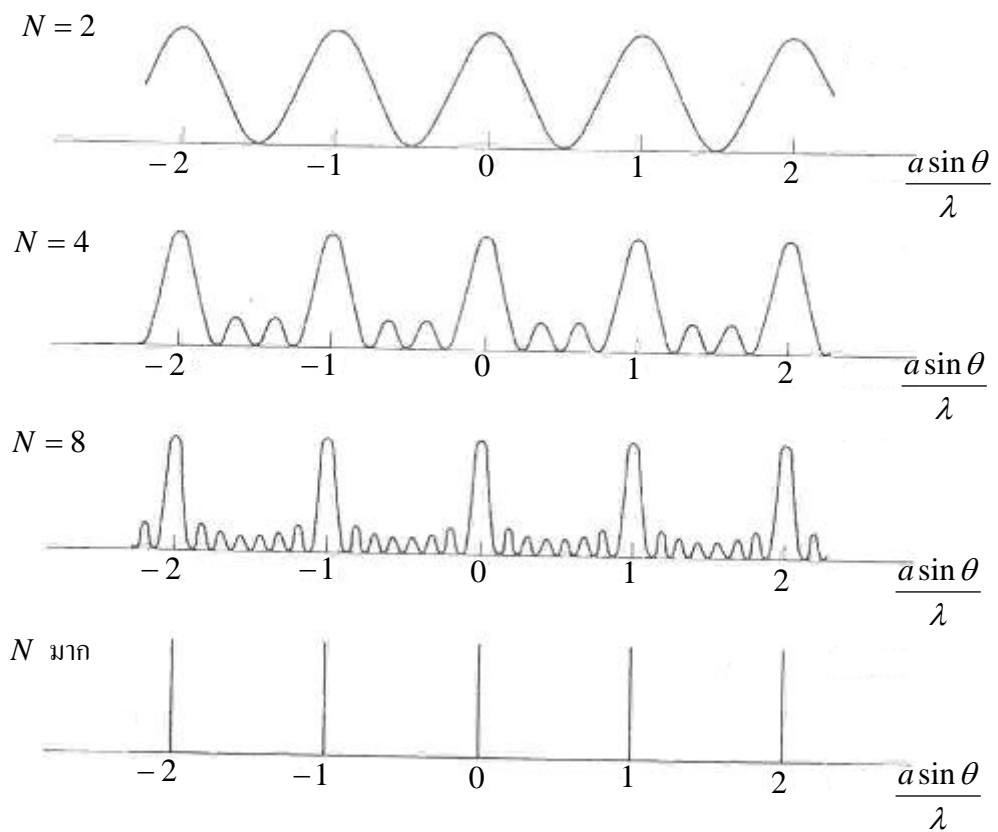
เพราะฉะนั้นจะได้ ความเข้มของคลื่นรวม (I)

$$I = N^2I_0 \quad (42)$$

เมื่อ

N คือ จำนวนแหล่งกำเนิดคลื่น

I_0 คือ ความเข้มของแต่ละแหล่งกำเนิดคลื่น



ภาพประกอบ 13 แสดงการกระจายความเข้มของการแทรกสอดของแสงจากแหล่งกำเนิดคลื่น
ที่มีจำนวนช่องแคบ N แตกต่างกัน

ที่มา: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2545). ฟิสิกส์ 2. หน้า 309.

เกรตติง (Grating)

เกรตติง (Grating) หรือ เกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction Grating) เป็นทัศนอุปกรณ์ (Optical Instrument) ที่ใช้ในการหาความยาวคลื่นของแสง มีลักษณะโปร่งใส เช่น แก้วใส พลาสติกใส เกรตติงประกอบด้วยร่องเล็กยาวที่ขนานกันจำนวนมาก และมีระยะระหว่างร่องเล็กยาวเท่ากัน

ประเภทของเกรตติง

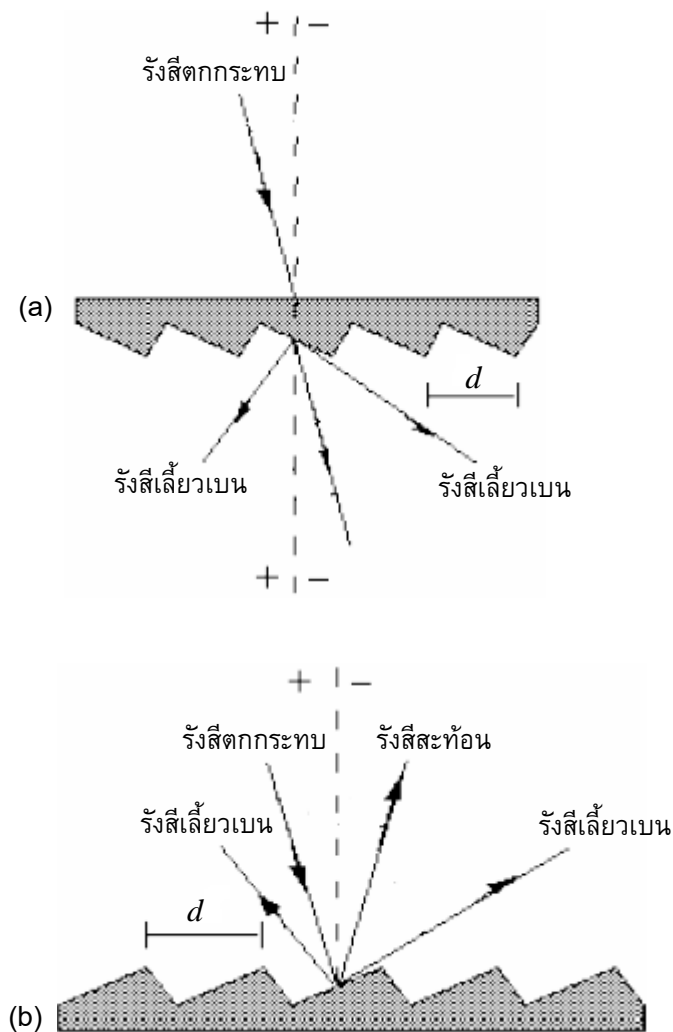
เกรตติงแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปตามลักษณะโครงสร้างของร่อง (Groove Profile) แสงที่กระเจิง (Scattered Light) ประสิทธิภาพ (Efficiency) และรูปร่างของวัสดุรองรับ (Substrate Shapes) คุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับวิธีการสร้างเกรตติง สามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆ โดยจำแนกตามวิธีการสร้างได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

1. เกรตติงแบบขีด (Ruled Grating)

เกรตติงแบบขีด เป็นเกรตติงที่สร้างขึ้นโดยการขีดเส้นบนผิวแผ่นแก้วرابด้วยปลายคมเพชร บริเวณระหว่างเส้นที่ถูกขีดจะเป็นร่องเล็กยาวเดี่ยว ซึ่งแสงสามารถทะลุผ่านร่องเหล่านี้ได้ เรียกว่า เกรตติงส่งผ่าน (Transmission Grating) ดังภาพประกอบ 14 (a) ถ้าเป็นเกรตติงที่สร้างขึ้นจากการขีดเส้นบนผิวโลหะหรือแก้วที่ฉาบเงินไว้ ทำให้แสงสะท้อนจากบริเวณระหว่างเส้นที่ขีด เรียกว่าเกรตติงสะท้อน (Reflection Grating) ดังภาพประกอบ 14 (b)

2. โฮโลกราฟฟิคเกรตติง (Holographic Grating)

โฮโลกราฟฟิคเกรตติง เป็นเกรตติงที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงสีเดียว (Monochromatic) ที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ (Coherent) แล้วบันทึกผลของการแทรกสอดลงบนแผ่นโฟโตเรซิส (Photoresist) แถบมืดคือบริเวณที่แสงไม่สามารถผ่านไปได้ ส่วนแถบสว่างเหมือนกับร่องเล็กๆ ที่แสงสามารถผ่านไปได้



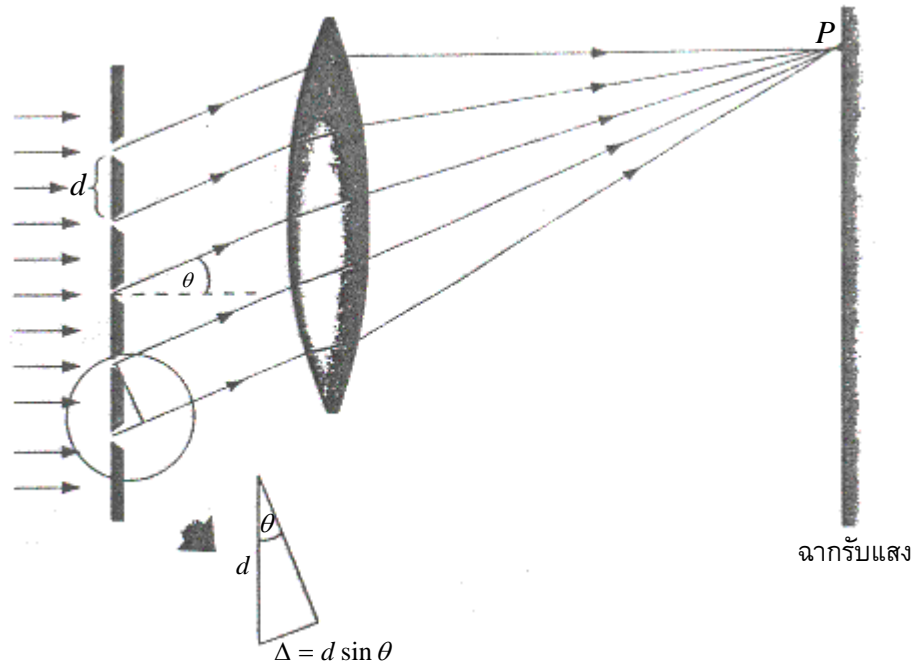
ภาพประกอบ 14 แสดงอันดับการเลี้ยวเบนของแสง (a) ผ่านเกรตติงระนาบแบบส่งผ่าน และ (b) เกรตติงสะท้อน

ที่มา: Christopher Palmer. (2002). *Diffraction Grating Handbook*. (Online).

หลักการทำงานของเกรตติง

เมื่อคลื่นระนาบตกกระทบจากทางด้านซ้ายมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของเกรตติงที่มีความกว้างของร่องแคบ a และระยะห่างระหว่างร่องแคบ d ดังภาพประกอบ 15 เชนส์นูช่วยในการรวมแสงให้ไปตกกระทบบที่จุด P ร่องแคบแต่ละร่องจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยมีเฟสตรงกัน เมื่อเริ่มออกจากร่องแคบที่ทิศทำมุม θ กับแนวราบ คลื่นจะเคลื่อนที่มีเส้นทางการเคลื่อนที่ต่างกัน $d \sin \theta$ ถ้าความแตกต่างเส้นทางเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น หรือเป็นเลขจำนวนเต็มของความ

ยาวคลื่น คลื่นจะมีเฟสตรงกันที่จุด P จะเกิดเป็นแถบสว่าง ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการแทรกสอดแบบเสริมสร้างกันตามสมการ (43)



ภาพประกอบ 15 แสดงลักษณะการเลี้ยวเบนของแสงเมื่อผ่านเกรตติงแบบขีด

ที่มา: สุรพล รักวิชัย. (2541). ฟิสิกส์ 2 สำหรับวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์.
บทที่ 16 หน้า 14.

ในการคำนวณหาตำแหน่งของแถบสว่าง หรือมุมที่แถบสว่างจากการเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงหาได้จากสมการ

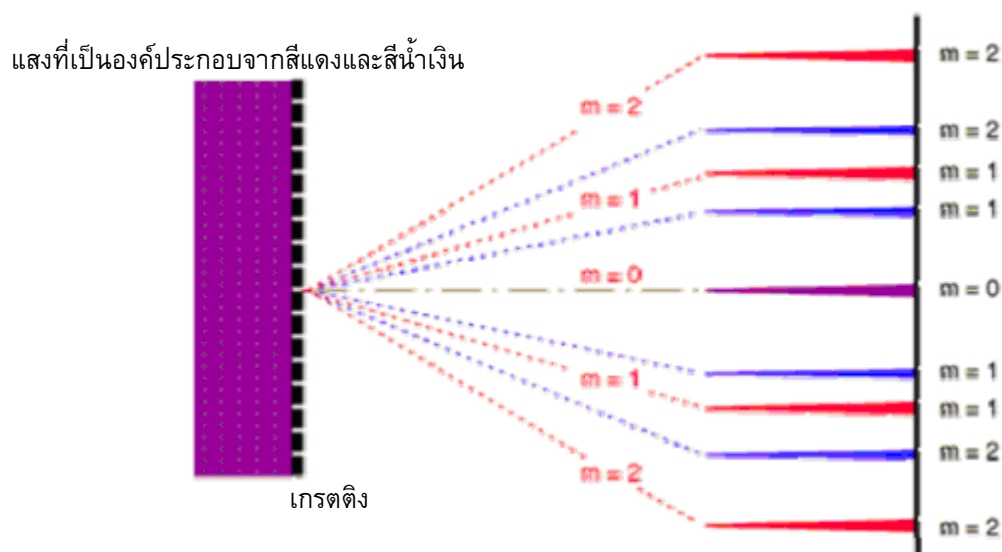
$$d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (43)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง $= \frac{1}{N}$

N คือ จำนวนร่องต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเกรตติง

m คือ อันดับของลวดลายการเลี้ยวเบน

เกรตติงเป็นทัศนอุปกรณ์ ซึ่งใช้แยกแสงที่ประกอบด้วยความยาวคลื่นต่างๆ ออกจากกัน สำหรับเกรตติงส่งผ่านนั้น อาศัยหลักการเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบเดี่ยวหรือช่องแคบคู่ เมื่อมีแสงซึ่งประกอบด้วยความยาวคลื่นหลายๆ ค่า มาตกกระทบบนพื้นผิวเกรตติงแล้วผ่านช่องแคบจะเกิดการเลี้ยวเบนจากแนวกลางออกไปเป็นมุมต่างๆ กัน ซึ่งจะให้ตำแหน่งความเข้มสูงสุด ที่แตกต่างกัน ยกเว้นอันดับศูนย์ซึ่งเหมือนกันหมด ไม่สามารถแยกความยาวคลื่นที่ต่างกันได้ ดังภาพประกอบ 16 ค่าสูงสุดจุดหนึ่งในอันดับเดียวกัน สำหรับความยาวคลื่นหลายๆขนาด ประกอบกันเป็นสเปกตรัม (Spectrum) ดังนั้น จึงมีสเปกตรัมอันดับที่หนึ่ง อันดับที่สอง อันดับที่สาม ($m = 1, 2, 3, \dots$) ซึ่งความยาวคลื่นยิ่งยาวมุมเบี่ยงเบน (Deviation Angle) θ ยิ่งมากในอันดับเดียวกันของสเปกตรัม เป็นไปตามสมการ (43) ดังนั้นแสงสีแดงจึงเบี่ยงเบนไปมากกว่าแสงสีม่วง เกรตติงเลี้ยวเบนไม่ต้องอาศัยสมบัติการกระจายแสงของตัวกลาง แต่ขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตของร่องเกรตติงเพียงอย่างเดียว ซึ่งเกรตติงจะกระจายแสงออกเป็นสเปกตรัมเช่นเดียวกับปริซึม แต่จะให้ค่าความยาวคลื่นที่แม่นยำกว่าปริซึม



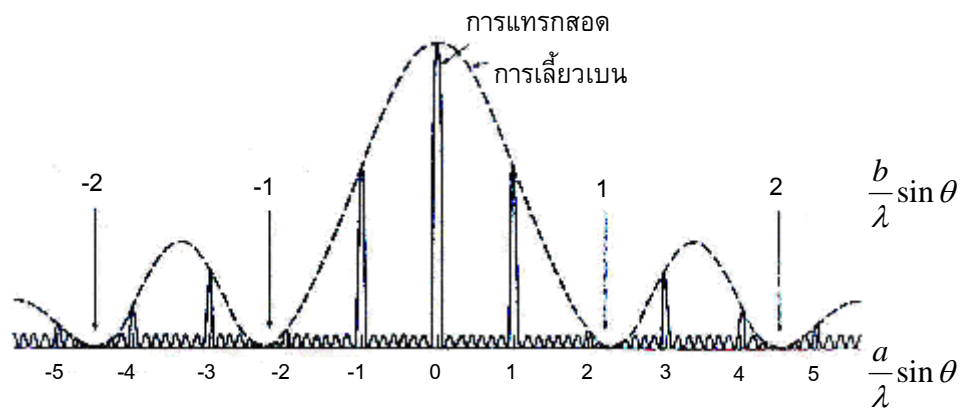
ภาพประกอบ 16 แสดงแสงที่เป็นองค์ประกอบจากสีแดงและสีน้ำเงินผ่านเกรตติงแล้วเลี้ยวเบน แยกเป็นแสงสีน้ำเงินและแสงสีแดง

ที่มา: Richard Fitzpatrick. (2003). *Electromagnetism and Optics*. (Online).

ถ้าเป็นแสงสีเดียว (Monochromatic) ผ่านเกรตติง จะปรากฏแถบสว่างแต่ละแถบอยู่ห่างกันมากขึ้น ทำให้สามารถวัดระยะทางต่างๆ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความยาวคลื่นได้

ในทางปฏิบัติความกว้าง a ของร่องเกรตติงมีค่าน้อยมาก ดังนั้น ความกว้างของแถบสว่างอันกลางที่เกิดจากร่องแคบจึงกว้างมาก ผลที่ได้ออกมาจึงคล้ายกับการแทรกสอดของคลื่นจากต้นกำเนิดอาพันธ์หลายแหล่งคล้ายการทดลองของยัง

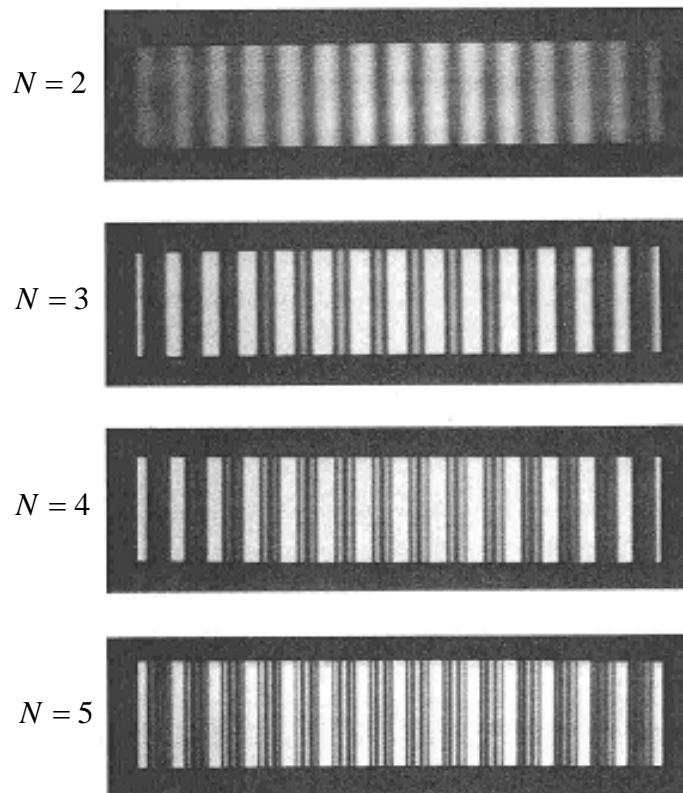
ความเข้มแสงที่เกิดขึ้นจะเป็นความเข้มรวมจากการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง แต่ละร่องของเกรตติงจะให้มีการเลี้ยวเบนแทรกสอดกันทำให้ได้รูปแบบสุดท้าย ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 แสดงการกระจายความเข้มของการแทรกสอดและเลี้ยวเบนของแสงเมื่อผ่านเกรตติง

ที่มา: ทบวงมหาวิทยาลัย. (2543). ฟิสิกส์ เล่ม 2. หน้า 227.

ลดรายละเอียดของการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงเมื่อผ่านช่องแคบจำนวน N ช่อง ซึ่งเป็นเหมือนแหล่งกำเนิดคลื่น จะแตกต่างกัน ดังภาพประกอบ 18 เมื่อมีจำนวนช่องแคบ N มากขึ้น แถบมีระยะห่างค่าสูงสุดหลักของแถบสว่างกลาง จะมีความกว้างของแถบมีดมากขึ้น และมีความกว้างของแถบมีดมากกว่าแถบสว่าง เมื่อ N เพิ่มขึ้น โดยแถบสว่างจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นอยู่กับมุม θ ตามสมการ $d \sin \theta = m\lambda$



ภาพประกอบ 18 แสดงผลของการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงจากแหล่งกำเนิดคลื่น
ที่มีจำนวนช่องแคบ N แตกต่างกัน

ที่มา: Eugene Hecht. (2002). *Optics*. p. 462.

กำลังแยก (Resolving Power) ของเกรตติง

ในการแยกเส้นสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน ความกว้างของเส้นจะต้อง
แคบมากๆ เท่าที่จะเป็นไปได้ ฉะนั้นเกรตติงจะต้องมีกำลังแยก (R) มาก

จากสมการ (43)

$$d \sin \theta = m\lambda$$

จะได้

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d} \quad (44)$$

หาดิฟเฟอเรนเชียล (Differentiation) ของสมการ (44) จะได้

$$\cos \theta \Delta \theta = \frac{m}{d} \Delta \lambda \quad (45)$$

จะได้

$$\Delta \theta = \frac{m\Delta \lambda}{d \cos \theta} \quad (46)$$

จากมาตรฐานของเรย์ลี (Rayleigh) กำหนดว่าค่ามุมที่แยกเส้นสเปกตรัมทั้งสองออกจากกันในทิศทางการเลี้ยวเบน ($\Delta \theta$) ต้องเท่ากับระยะห่างเชิงมุมระหว่างค่าสูงสุดหลักค่าหนึ่งกับค่าต่ำสุดที่ติดกัน

นั่นคือ

$$\Delta \theta = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta} \quad (47)$$

แทนค่าสมการ (47) ในสมการ (45)

จะได้

$$\frac{\lambda}{\Delta \lambda} = Nm \quad (48)$$

ทำให้ได้กำลังแยกของเกรตติงเป็น

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm \quad (49)$$

เมื่อ

- R คือ กำลังแยกของเกรตติง
 λ เป็นผลรวมของค่าเฉลี่ยความยาวคลื่นทั้งสอง
 โดย $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$
 $\Delta\lambda$ เป็นผลต่างของความยาวคลื่นทั้งสอง
 โดย $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$
 N คือ จำนวนร่องของเกรตติง
 m คือ ลำดับของลวดลายการเลี้ยวเบน โดย $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

เกรตติงที่มีกำลังแยกสูง สามารถแยกความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกันมากได้ กำลังแยกจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า m เพิ่มขึ้น และค่า R จะมากเมื่อ N มีค่ามาก ในกรณีที่ $m = 0$, $R = 0$ แสดงว่าแสงหลายความยาวคลื่นที่อันดับที่ศูนย์ไม่สามารถแยกได้

เกรตติงถอดแบบ (Replica)

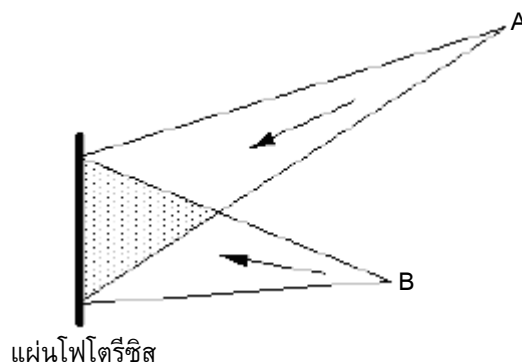
เนื่องจากเกรตติงซึ่งถูกขีดบนพื้นผิวต้นกำเนิดซึ่งเป็นต้นแบบของเกรตติงมีน้อย ในทางปฏิบัติเพื่อใช้งานจึงได้ทำรูปถอดแบบเกรตติง (Replica) ของเกรตติงต้นแบบ (Master Grating)

เกรตติงถอดแบบ เป็นเกรตติงที่ได้ทำการถอดแบบมาจากเกรตติงต้นแบบ โดยการเทชั้นบางของสารละลายคอลลอยด์ลงบนพื้นผิวเกรตติงต้นแบบ เมื่อสารละลายแข็งตัว จึงแกะฟิล์มของคอลลอยด์ออกจากพื้นผิวเกรตติงต้นแบบ และนำไปติดระหว่างแผ่นแก้วสองแผ่น จะได้เกรตติงส่งผ่านถอดแบบจำนวนมาก ในปัจจุบันมักใช้เกรตติงเพื่อศึกษาสเปกตรัมในบริเวณที่ตามองเห็น มีประมาณ 1,000 - 2,000 ร่องต่อมิลลิเมตร

โฮโลกราฟฟิคเกรตติง (Holographic Grating)

ประวัติการสร้างโฮโลกราฟฟิคเกรตติง

1. โฮโลกราฟฟิคเกรตติงรุ่นที่หนึ่ง (A First Generation Holographic Grating) การแทรกสอดของลำแสงเกิดจากลำแสงหน้าคลื่นทรงกลมมาตัดกัน แสงเลเซอร์รวมกันโดยผ่านรูเข็ม (Pinholes) A และ B ซึ่งเป็นเหมือนแหล่งจุดกำเนิดของแสง ลำแสงแยกออกเป็นสองลำแสงไปยังแผ่นโฟโตรีซิสในแนวระนาบ เกิดการแทรกสอดกันเป็นแถบมืดและแถบสว่าง ดังภาพประกอบ 19 รูปแบบของริ้ว (Fringe) ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งของแถบมืดและแถบสว่างที่ไม่เท่ากัน รูปแบบของริ้วนี้ต้องแก้ไขที่เส้นโค้งเลี้ยวเบนของหน้าคลื่น โดยไม่คำนึงถึงรูปร่างของแผ่นโฟโตรีซิส ดังนั้นจะต้องเตรียมการเรื่องการรวมแสง โดยการแก้ไขลักษณะของเส้นโค้งและความผิดปกติของริ้วที่ปรากฏขึ้นให้น้อยลง



ภาพประกอบ 19 แสดงการแทรกสอดของลำแสงหน้าคลื่นทรงกลมผ่านรูเข็ม A และ B

ที่มา: Christopher Palmer. (2002). *Diffraction Grating Handbook*. (Online).

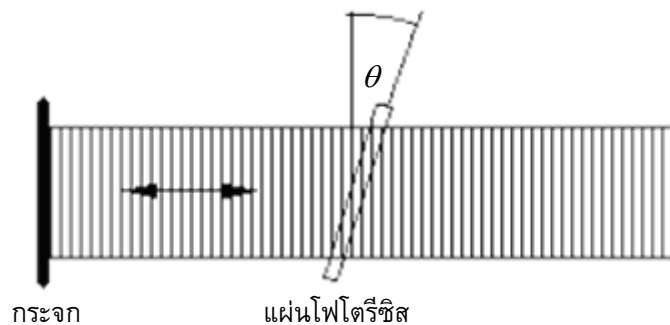
2. โฮโลกราฟฟิคเกรตติงรุ่นที่สอง (A Second Generation Holographic Grating) ได้มีการเพิ่มกระจกและเลนส์เข้าไปในการบันทึก การแทรกสอดของลำแสงเกิดจากสองลำแสงของคลื่นระนาบมาตัดกัน มีการเพิ่มมุมที่เป็นอิสระในการบันทึกทางเรขาคณิต เช่น การกำหนดตำแหน่งการกำหนดหรือปรับทิศทางและรัศมีของกระจก ทำให้ความผิดปกติลดลงมากกว่าสมัยที่หนึ่ง

ประเภทของโฮโลกราฟฟิคเกรตติง

ประเภทของโฮโลกราฟฟิคเกรตติงสามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆ โดยจำแนกตามวิธีการสร้างจากการแทรกสอดของลำแสงได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

1. การแทรกสอดของลำแสงเดี่ยว (Single Beam)

รูปแบบการแทรกสอดเกิดจากลำแสงอาพันธ์ (Coherent) ของคลื่นระนาบ ซึ่งเป็นแสงสีเดียว (Monochromatic) ให้ลำแสงขนานเคลื่อนเข้ามาทางขวาผ่านแผ่นโปร่งใส (Blank) และสะท้อนที่กระจกราบ เกิดเป็นคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ตัดกันเป็นรูปแบบความเข้มสูงสุดตามหลักการแทรกสอดที่แผ่นโปร่งใสซึ่งเป็นแผ่นโฟโตเรซิส (Photoresist) ระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง d ขึ้นอยู่กับมุม θ ระหว่างพื้นผิวของฐานกระจกและแผ่นโปร่งใสระนาบ ดังภาพประกอบ 20



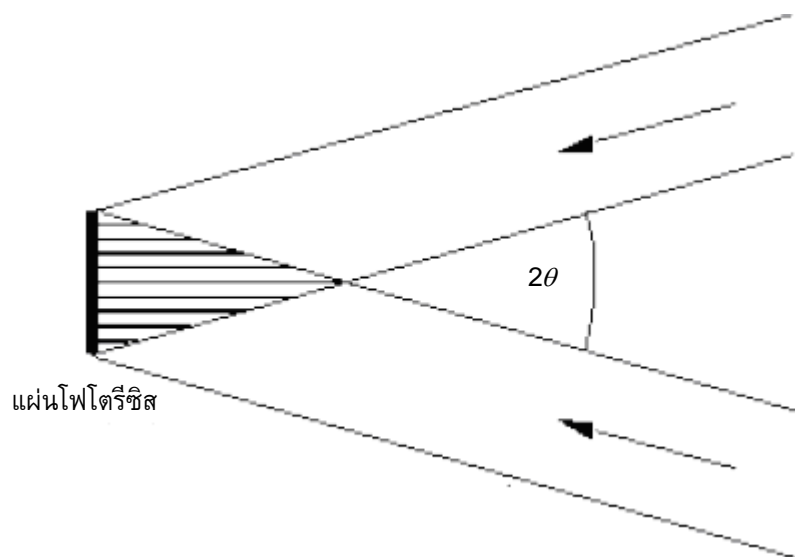
ภาพประกอบ 20 แสดงการบันทึกการแทรกสอดของลำแสงเดี่ยว

ที่มา: Christopher Palmer. (2002). *Diffraction Grating Handbook*. (Online).

2. การแทรกสอดของสองลำแสง (Double Beam)

รูปแบบของการแทรกสอดของสองลำแสง เกิดจากลำแสงอาพันธ์ (Coherent) ของคลื่นระนาบสองลำแสงที่มีความยาวคลื่น (λ) เท่ากันมาตัดกันและทำมุมต่อกัน 2θ ในแนวระนาบ ดังภาพประกอบ 21 การแทรกสอดของลำแสงที่หนึ่งกับลำแสงที่สอง จะเสริมกันหรือหักล้างกันขึ้นอยู่กับผลต่างของทางเดินแสง การแทรกสอดแบบเสริมกัน จะเกิดขึ้นเมื่อผลต่างของทางเดินแสงเป็นเลขจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น ได้เป็นแถบสว่าง ส่วนการแทรกสอดแบบหักล้างกันจะเกิดขึ้นเมื่อผลต่างของทางเดินแสงเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น ได้เป็นแถบมืด

แถบสว่างและแถบมืดจากการแทรกสอดที่เกิดขึ้นแต่ละแถบ จะมีความเข้มของแสงสูงสุดหรือต่ำสุดที่มีค่าเท่ากัน และความกว้างของแถบแต่ละแถบจะเท่ากันตลอดการแทรกสอด ถ้าผิวหน้าของแผ่นโพโตรีซิสมีพื้นราบเรียบ แถบสว่างและแถบมืดที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะของริ้วตรงขนาน และมีความกว้างของแถบแต่ละแถบเท่ากันตลอด ถ้าผิวหน้าของแผ่นโพโตรีซิสเว้า จะทำให้แถบมืดและแถบสว่างมีลักษณะของริ้วโค้งงอไม่เท่ากัน เกรตติงที่มีความเข้มของแสง ที่มีริ้วของแถบมืดและแถบสว่างซึ่งมีความกว้างของแถบเท่ากันตลอด เรียกว่า โฮโลกราฟีคเกรตติงที่สมมูลกับเกรตติงแบบซิด (Classical Equivalent Holographic Grating) รูปแบบของแถบสว่างและแถบมืดนั้น แถบสว่างจะเป็นเหมือนร่องที่ให้แสงส่องผ่านซึ่งเหมือนกับแบบฉบับเกรตติงแบบซิด



ภาพประกอบ 21 แสดงรูปแบบของการแทรกสอดของสองลำแสงที่มีความยาวคลื่น λ เท่ากัน ทำมุมต่อกัน 2θ ในแนวระนาบ

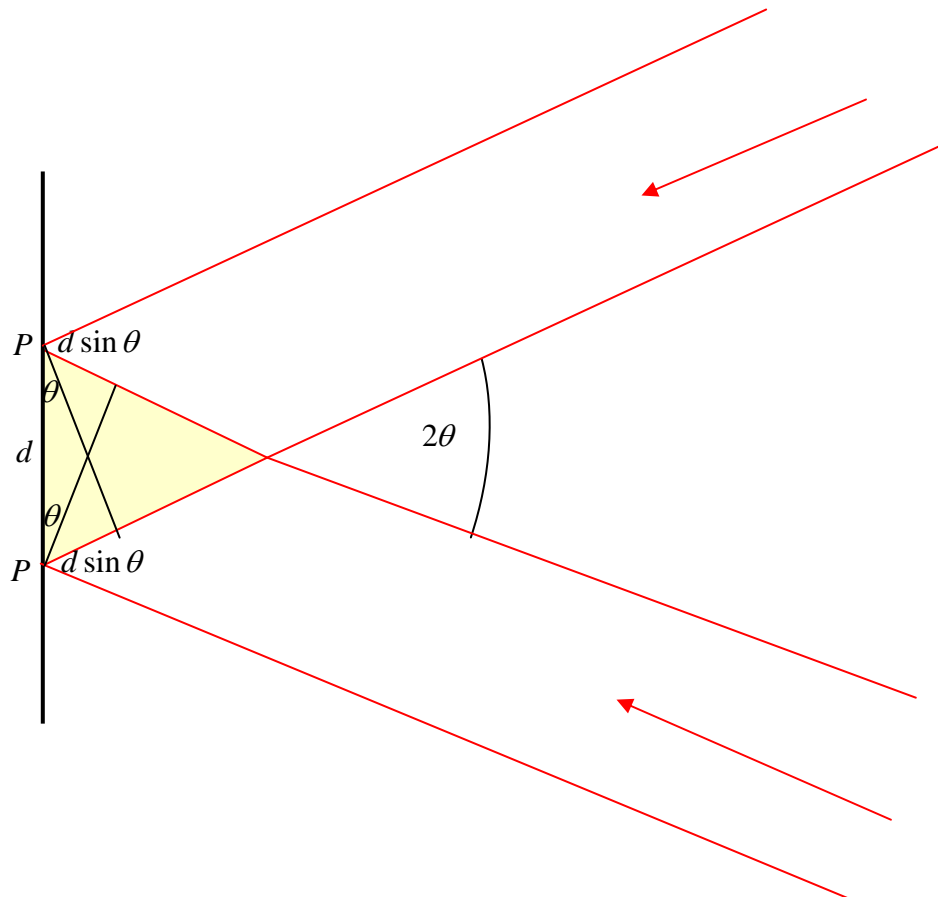
ที่มา: Christopher Palmer. (2002). *Diffraction Grating Handbook*. (Online).

กระบวนการสร้างโฮโลกราฟีคเกรตติง

1. การเกิดรูปแบบการแทรกสอด

เป็นการสร้างโดยใช้สองลำแสงอาพันธ์ (Coherent) ของคลื่นระนาบ ซึ่งเป็นแสงสีเดียว (Monochromatic) มาตัดกันที่จุดหนึ่ง ดังภาพประกอบ 22 การรวมกันของความเข้มของแสงก่อให้เกิดรูปแบบการกระจายความเข้มของแสงเป็นแถบมืดและแถบสว่างซึ่งมีความกว้างของแถบเท่ากัน แผ่นภาพถ่าย (Photographic Plate) จะบันทึกรูปแบบการกระจายความเข้มของ

แสงนั้นไว้ แถบของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มของแสงสูงสุดหรือต่ำสุดที่มีค่าความเข้มเท่ากัน และความกว้างของแต่ละแถบเท่ากันตลอดการแทรกสอด



ภาพประกอบ 22 แสดงรูปแบบของการแทรกสอดของสองลำแสงที่มีความยาวคลื่น λ เท่ากัน ทำมุมต่อกัน 2θ ในแนวระนาบ

จากภาพประกอบ 22 ลำแสงที่หนึ่งกับลำแสงที่สอง จะมีความต่างเฟสเท่ากับระยะทางของสองลำแสงมาบวกกัน จะได้ผลต่างของทางเดินแสงของสองลำแสงเท่ากับ $2d \sin \theta$

การแทรกสอดของลำแสงที่หนึ่งกับลำแสงที่สอง จะเสริมกันหรือหักล้างกันขึ้นอยู่กับผลต่างของทางเดินแสง การแทรกสอดแบบเสริมกัน จะเกิดขึ้นเมื่อผลต่างของทางเดินแสงเป็นเลขจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น

นั่นคือ

$$d \sin \theta + d \sin \theta = m\lambda$$

จะได้

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (50)$$

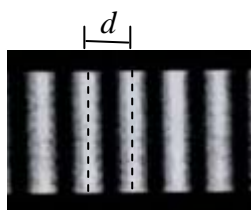
เมื่อ

m คือ ลำดับของการแทรกสอด มีค่า $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$

λ คือ ความยาวคลื่นแสง

d คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแถบสว่างสองแถบที่อยู่

ติดกัน ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 แสดงระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแถบสว่างสองแถบที่อยู่ติดกัน d

ดังนั้น สามารถหาค่า d ได้จาก

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (51)$$

เมื่อ θ เป็นครึ่งหนึ่งของมุมระหว่างสองลำแสง ถ้ามุม θ มีค่าน้อย จะได้ความกว้าง d มีค่ามาก ในขณะที่เดียวกัน ถ้ามุม θ มีค่ามาก ความกว้างของร่อง d จะมีค่าน้อย ค่าต่ำสุดของ d คือ $\lambda/2$ ซึ่งจะให้เกรตติงที่มีจำนวนร่องประมาณ 1,000 ร่องต่อมิลลิเมตร

2. การเกิดรูปร่างของเกรตติง

ต้นแบบโฮโลกราฟฟิคเกรตติง (Master Holographic Grating) ทำโดยการบันทึกรูปแบบการแทรกสอดของแสงลงบนแผ่นโฟโตเรซิสต์ (Photoresist) การบันทึกแสงต้องเลือกเลเซอร์ให้เหมาะกับแผ่นโฟโตเรซิสต์ ถ้าการรวมกันของความเข้มข้นของเส้นเลเซอร์ และความไวต่อความยาวคลื่นแสงของแผ่นโฟโตเรซิสต์มีค่าสูง เวลาที่จะให้ถูกแสงก็ต้องน้อยลง

แผ่นโฟโตเรซิสต์ที่ใช้ทำเกรตติงจะมีสองแบบเรียกว่าแบบบวก (Positive) และแบบลบ (Negative) แบบบวกหลังจากถ่ายภาพและล้างฟิล์มแล้วสามารถมองเห็นภาพได้ ขณะที่แบบลบจะเห็นภาพกลับกัน สำหรับแบบบวก บริเวณแถบสว่างจะมีลักษณะรูปร่างปรีวีเป็นเส้นโค้งเว้าคล้ายแอ่งลึก (Valley) ส่วนแถบมืด จะมีลักษณะรูปร่างปรีวี เป็นเส้นโค้งนูนคล้ายสันเขา (Ridges) ดังภาพประกอบ 24 ต้นแบบโฮโลกราฟฟิคเกรตติง จะมีร่องเป็นเส้นโค้งไซน์ (Sinusoidal) เหมือนสันเขา และได้นำต้นแบบโฮโลกราฟฟิคเกรตติงไปเคลือบเพื่อทำเกรตติงถอดแบบเหมือนกับเกรตติงแบบขีด



ภาพประกอบ 24 แสดงรูปแบบการเกิดรูปร่างแบบสันเขาและแอ่งลึกของแผ่นโฟโตเรซิสต์แบบบวก

ที่มา: R. Dylewicz; et al. (2005). *Holographic Lithography for Grating Coupler Fabrication in Gallium Nitride Grown on Sapphire Substrate*. (Online).

กระบวนการบันทึกของโฮโลกราฟฟิคเกรตติง

โฮโลกราฟฟิคเกรตติงบันทึกรูปแบบการแทรกสอดของแสงลงบนแผ่นโฟโตรีซิส แสงที่ใช้ต้องมีความนิ่ง เช่น แสงเลเซอร์ และอุปกรณ์ทางแสงต้องมีความแม่นยำและถูกต้อง ต้องปรับให้ลำแสงขนาน แสงที่ได้จะต้องไม่มีจุดต่างดำหรือเก็ดริ้ว ควรหลีกเลี่ยงอุณหภูมิที่ไม่คงที่ขณะทำการทดลอง

การบันทึกรูปแบบการแทรกสอดของแสง อุปกรณ์ที่ใช้ต้องมีขอบเขตการเลี้ยวเบนที่มีคุณภาพใกล้เคียงกัน เช่น แผ่นโฟโตรีซิสที่ใช้ในการบันทึกต้องเหมาะสมกับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ การปรับกระจก รูเข็ม และเครื่องแยกลำแสงจะต้องปรับอย่างละเอียดด้วยความระมัดระวัง และต้องตั้งเวลาสำหรับการบันทึก

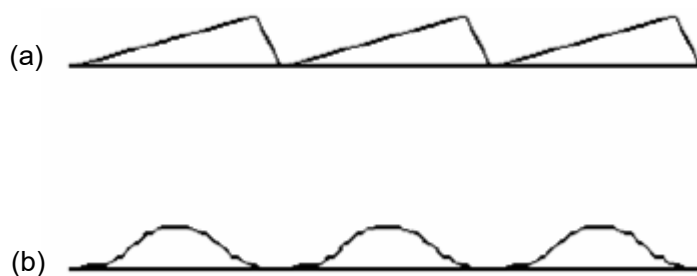
แผ่นเกรตติงที่เป็นต้นแบบโฮโลกราฟฟิคเกรตติงจะมีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มถ่ายรูปทั่วไป ระหว่างการบันทึกระยะเวลาเป็นสิ่งสำคัญในการเกิดแถบมืดและแถบสว่างที่มีรูปแบบรีวที่สม่ำเสมอตามต้องการ หลังจากนั้นนำแผ่นโฟโตรีซิสไปจุ่มลงในน้ำยาเคมี จะเกิดรูปร่างของร่องบนพื้นผิวแผ่นโฟโตรีซิส

ความแตกต่างระหว่างเกรตติงแบบขีดและโฮโลกราฟฟิคเกรตติง

1. ความแตกต่างในรูปร่างของร่อง (Groove Profile)

รูปร่างของร่องก็มีผลอย่างมากต่อความเข้มของแสง ที่เลี้ยวเบนออกจากแผ่นเกรตติง เกรตติงแบบขีด อาจมีรูปร่างของร่อง เป็นรูปสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมคางหมู แต่โฮโลกราฟฟิคเกรตติงมักจะมีรูปร่างของร่องเป็นรูปไซน์หรือเกือบเหมือนไซน์ ดังภาพประกอบ 25 (a) และ 25 (b) ตามลำดับ เกรตติงแบบขีดและโฮโลกราฟฟิคเกรตติงมีลักษณะเหมือนกันในทุกๆ อย่าง ยกเว้นรูปร่างของร่องซึ่งจะมีประสิทธิภาพ (ในความเข้มของการเลี้ยวเบน) ต่างกันสำหรับความยาวคลื่นหนึ่งๆ และอันดับ (Order) ของสเปกตรัมหนึ่งๆ

ยิ่งกว่านั้น เกรตติงแบบขีด สามารถตัดแต่งหน้า (Blazed) ได้ง่ายกว่าโฮโลกราฟฟิคเกรตติง โดยการเลือกรูปร่างของมุมที่เว้าของคมเพชร ปรับเปลี่ยนมุมในตำแหน่งที่แตกต่างกันลงบนพื้นผิวระหว่างทำการขีดจึงเรียกว่ามัลติพาร์ทิไทเกรตติง (Multipartite Grating) ส่วนโฮโลกราฟฟิคเกรตติงสามารถตัดแต่งหน้า (Blazed) โดยการยิงด้วยไอออน (Ion Etching) จึงทำให้มีประสิทธิภาพ (ในความเข้มของการเลี้ยวเบน) เกือบจะคงที่ มีการแปรเปลี่ยน (Variation) ของประสิทธิภาพน้อยกว่าเกรตติงแบบขีด



ภาพประกอบ 25 แสดงรูปโครงสร้างของร่อง (a) เกรตติงแบบซี่ด และ (b) โฮโลกราฟีคเกรตติง

ที่มา: Christopher Palmer. (2002). *Diffraction Grating Handbook*. (Online).

2. ความแตกต่างของแสงที่กระเจิง (Scattered Light)

ระดับความแม่นยำของชั้นโลหะไม่มีผลต่อโฮโลกราฟีคเกรตติง ซึ่งแตกต่างจากการใช้เครื่องจักรกลซี่ดแบบเกรตติงแบบซี่ด ซึ่งจะเกิดการผิดพลาดจากการซี่ดได้ การซี่ดจะซี่ดที่ละเอียด และรูปร่างของร่องที่เกิดจากการซี่ดจะมีรูปร่างที่คล้ายๆ กัน ส่วนโฮโลกราฟีคเกรตติงรูปร่างของร่องจะเป็นแบบเดียวกันทั้งหมดและเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ถ้ามีวิธีการทำที่เหมาะสมสามารถจัดการความผิดพลาดจากการสุมตำแหน่งของเครื่องจักรกลแบบซี่ด แสงที่กระเจิงที่เกิดจากโฮโลกราฟีคเกรตติงสามารถดำเนินการจำกัดขอบเขตได้ ขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องมือในการดำเนินการของระบบ

3. ความแตกต่างในข้อจำกัดของร่อง (Limitations in The Groove Profile)

เกรตติงแบบซี่ดและโฮโลกราฟีคเกรตติงจะมีขอบเขตของจำนวนร่องต่อมิลลิเมตรที่แตกต่างกัน เกรตติงแบบซี่ดจะมีจำนวนร่องน้อยที่สุดประมาณ 30 ร่องต่อมิลลิเมตร และสามารถผลิตจำนวนร่องได้สูงสุดมากกว่า 10,000 ร่องต่อมิลลิเมตร ส่วนโฮโลกราฟีคเกรตติงจะมีจำนวนร่องน้อยที่สุดประมาณ 100 ร่องต่อมิลลิเมตร และสามารถผลิตจำนวนร่องได้สูงสุดในช่วงที่สามารถมองเห็นการบันทึกของแสงได้ คือ ประมาณ 1,000 ร่องต่อมิลลิเมตร

4. ความแตกต่างของรูปแบบร่อง (Groove Patterns)

เกรตติงระนาบ (Plane Grating) แบบซี่ดส่วนใหญ่จะมีความกว้างของร่องตรงและเท่ากัน ส่วนเกรตติงแบบเว้า (Concave Grating) ความกว้างของร่องจะไม่เท่ากัน เนื่องจากส่วนโค้งของวงกลมบนผิวหน้าเกรตติงเป็นสิ่งกำหนดรูปแบบของร่อง ความเบี่ยงเบนจากปกติสามารถทำให้น้อยลงได้ขึ้นอยู่กับความตรงของร่อง โดยการควบคุมเครื่องจักรให้เหมาะสม

โฮโลกราฟีเฟคเกรตติงไม่ต้องการความตรงของร่อง เส้นโค้งของร่องสามารถทำให้มีความผิดปกติน้อยลงได้ในการแยกสเปกตรัม (Spectrum) ของแสง โดยการใช้แสงที่มีความราบเรียบในการบันทึก และแยกความยาวคลื่นต่างๆ ออกมาพร้อมกัน โฮโลกราฟีเฟคเกรตติงจึงสามารถสร้างและปรับปรุงรูปแบบของเกรตติงให้ดีขึ้นได้ ขณะที่เกรตติงแบบขีดไม่สามารถหารูปแบบที่เหมาะสมในการแยกสเปกตรัมของแสง

5. ความแตกต่างของรูปร่างวัสดุรองรับ (Substrate Shapes)

โฮโลกราฟีเฟคเกรตติงใช้รูปแบบบันทึกการแทรกสอดของแสงซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างหรือมิติของวัสดุรองรับ ซึ่งเป็นการทำที่ง่ายกว่าการใช้เครื่องจักรกลที่ลักษณะของวัสดุรองรับจะมีผลต่อการทำเกรตติงแบบขีด รูปร่างของวัสดุรองรับจะส่งผลต่อลักษณะเฉพาะของประสิทธิภาพของเกรตติงแบบขีดและโฮโลกราฟีเฟคเกรตติง

ประสิทธิภาพของเกรตติงจะขึ้นอยู่กับรูปโครงสร้างของร่อง เส้นโค้งประสิทธิภาพ (ในความเข้มของการเลี้ยวเบน) จะมาจากผลรวมของเส้นโค้งประสิทธิภาพหลายเส้นในบริเวณเล็กๆ ของเกรตติง ซึ่งแต่ละเส้นโค้งจะได้มาจากรูปโครงสร้างของร่องแต่ละร่องและมุมตกกระทบและมุมเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งต่างๆกัน

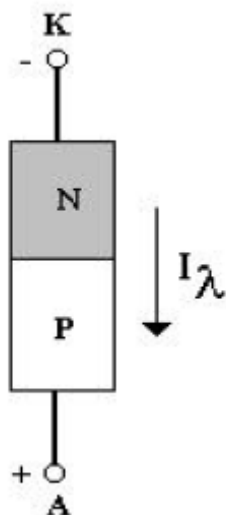
6. ความแตกต่างของเวลาการทำเกรตติงต้นแบบ (Time for Master Gratings)

เกรตติงต้นแบบแบบขีด โดยการทำให้ร่องแต่ละร่องเป็นมันวาว และใช้เพชรขีด ความกว้างของระยะทางไปบนเกรตติงหนึ่งอัน ตัวอย่างเช่น เกรตติงสี่เหลี่ยม 100 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร มีความกว้าง 1,000 ร่องต่อมิลลิเมตร ต้องการให้เพชรเคลื่อนที่ไปมากกว่า 10 กิโลเมตร ต้องใช้เวลาหลายสัปดาห์ในการทำ

การสร้างต้นแบบโฮโลกราฟีเฟคเกรตติง ร่องแต่ละร่องจะสร้างพร้อมกันในเวลา 1-10 นาที ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของแสงเลเซอร์ที่ใช้ และปฏิกิริยาการไวต่อแสงของแผ่นโฟโตรีซิสที่มีต่อความยาวคลื่นนั้น ต้นแบบโฮโลกราฟีเฟคเกรตติงสามารถผลิตได้เร็วกว่าต้นแบบเกรตติงแบบขีด ความสม่ำเสมอของแสงในการบันทึกและสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญต่อความแม่นยำในการบันทึกแบบโฮโลกราฟีเฟคเกรตติง สำหรับเกรตติงระนาบต้องการลำแสงที่ขนานกันในระดับสูงซึ่งสามารถจำกัดความกว้างของเกรตติงได้ ต้นแบบโฮโลกราฟีเฟคเกรตติงมีความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 180 มิลลิเมตร

โฟโตไดโอด (Photo Diode)

โฟโตไดโอด เป็นอุปกรณ์จำพวกไดโอดซึ่งทำจากสารกึ่งตัวนำชนิด P และสารกึ่งตัวนำชนิด N ดังภาพประกอบ 26 รอยต่อพีเอ็น (PN) จะถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุที่แสงผ่านได้ เช่น กระจกใส โฟโตไดโอดจะมีช่องเล็กๆ สำหรับรับแสง และเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า



ภาพประกอบ 26 แสดงรูปโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพีเอ็น

ที่มา: อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และวงจร. (2008). (ออนไลน์).

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด

เมื่อต่อขั้วไฟฟ้าบวกเข้าทางด้านพี เรียกว่า แอโนด (Anode) และขั้วไฟฟ้าลบเข้าทางด้านเอ็น เรียกว่า แคโทด (Cathode) โดยที่แรงดันคร่อมที่หัวต่อพีเอ็นเกินค่าหนึ่งที่เรียกว่า Cut-in Voltage ไดโอดจะเริ่มนำกระแสได้ดี ถึงแม้ว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลมากขึ้นๆ แรงดันคร่อมตัวไดโอดจะมีค่าเกือบคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำ เช่น เจอร์เมเนียม มีแรงดันคร่อมตัวไดโอดประมาณ 0.3 โวลต์ ซิลิกอน ประมาณ 0.6 โวลต์ เป็นต้น เรียกการต่อขั้วไฟฟ้ากับไดโอดแบบนี้ว่า ไบแอสตาม (Forward Bias)

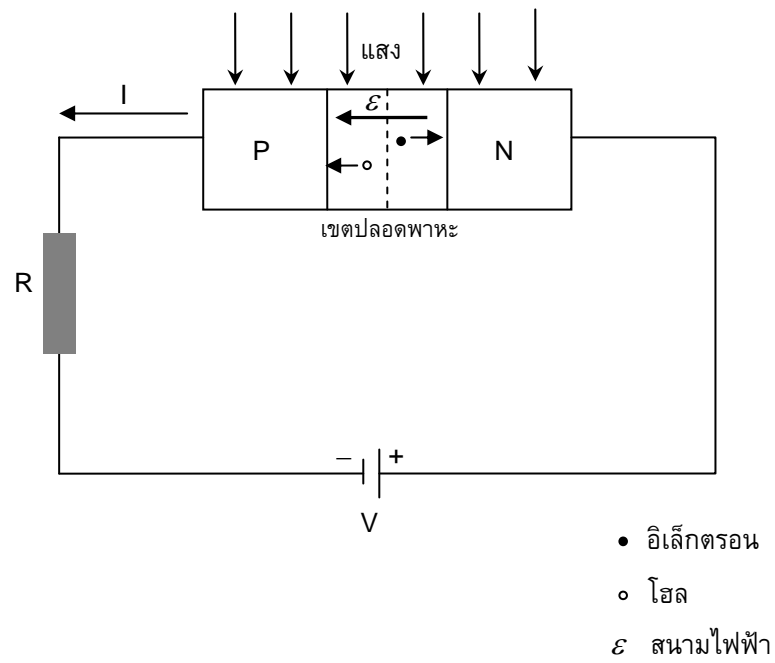
ในทางตรงกันข้าม เมื่อต่อขั้วไฟฟ้าบวกเข้าทางด้านเอ็นและขั้วไฟฟ้าลบเข้าทางด้านพี ไดโอดจะไม่นำไฟฟ้า แต่จะมีกระแสรั่วไหล (Leakage Current) ผ่านตัวไดโอดได้เล็กน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำ ความเข้มข้นของสารเจือปนของชั้นพีและเอ็น พื้นที่หน้าตัด และอุณหภูมิ

เรียกการต่อขั้วไฟฟ้าแบบนี้ว่า ไบแอสย้อนกลับ (Reverse Bias) ถ้าแรงดันคร่อมตัวไดโอดเพิ่มขึ้นถึงค่าๆหนึ่ง จะมีกระแสไหลผ่านไดโอดมากขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่แรงดันมีค่าเกือบคงที่ และอาจทำให้ไดโอดเสียหายได้ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นเกินความสามารถที่ไดโอดจะทนได้ เรียกแรงดันนี้ว่าแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage)

การทำงานของไดโอดรับแสง

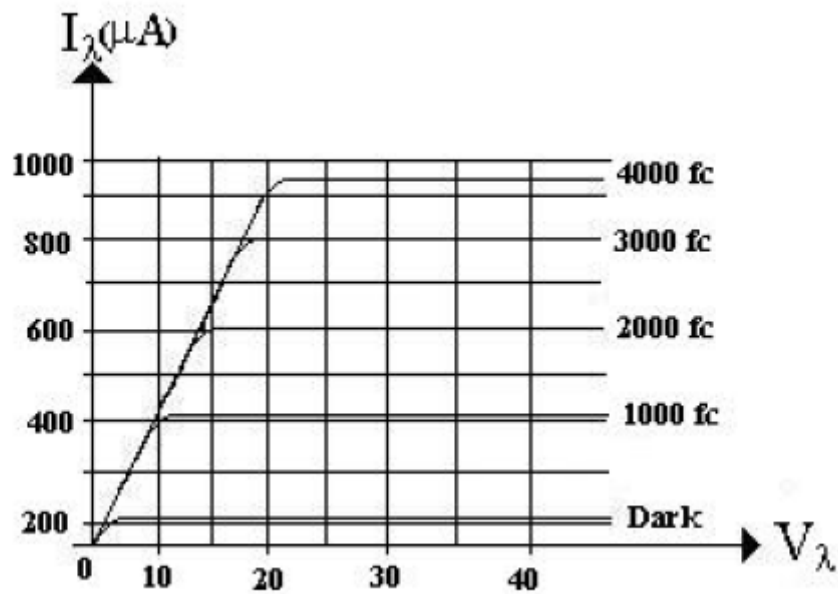
ที่หัวต่อพีเอ็น โฮล (Hole) ที่มีอยู่หนาแน่นในสารพีจะถ่ายเทผ่านรอยต่อ (Junction) ไปสู่สารเอ็น และอิเล็กตรอนในสารเอ็นจะถ่ายเทไปสู่สารพี เนื่องจากความแตกต่างของระดับความเข้มข้นของพาหะข้างมาก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การแพร่ซึม (Diffusion) โฮลและอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทข้ามรอยต่อจะรวมกับพาหะต่างชนิดกับมัน ทำให้พาหะข้างมาก (Majority Carriers) ในชั้นสารพีและเอ็น ในบริเวณใกล้ๆรอยต่อ มีค่าต่ำกว่าค่าที่สมดุลความร้อน (Thermal Equilibrium Concentration) ทำให้ในสารพีส่วนที่อยู่ใกล้รอยต่อมีความเข้มข้นของโฮลน้อยกว่าของ Acceptor Ions บริเวณนี้จึงมีประจุไฟฟ้าลบ ในทำนองเดียวกันในสารเอ็นส่วนที่อยู่ใกล้รอยต่อจะมีประจุไฟฟ้าบวก บริเวณประจุไฟฟ้าลบในสารพีและบริเวณประจุไฟฟ้าบวกในสารเอ็นนี้ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อมีทิศทางจากเอ็นมาพี ซึ่งจะหน่วงการถ่ายเทของพาหะข้างมากให้ช้าลง และน้อยลง และผลักดันให้เกิดการถ่ายเทของพาหะข้างน้อย (Minority Carriers) ผ่านรอยต่อมากขึ้นด้วย เรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ (Depletion Region)

เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำจะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เลื่อนขึ้นไปอยู่ที่แถบความนำแล้วตกลงมารวมกับโฮลในแถบวาเลนซ์ ซึ่งจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงให้เป็นไฟฟ้า เพราะไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนออกจากสารกึ่งตัวนำ (ไม่มีกระแสไหล) ดังนั้นจะต้องทำให้เกิดการแยกกันก่อนของอิเล็กตรอนและโฮล โดยใช้หลักการของรอยต่อพีเอ็น ซึ่งรอยต่อระหว่างสารพีเอ็น จะเกิดช่องว่างบริเวณรอยต่อ เมื่อทำการไบแอสแบบย้อนกลับ (Reverse Bias) ให้แก่สารพีเอ็น จะทำให้ช่องว่างบริเวณรอยต่อกว้างขึ้น ซึ่งในสภาวะดังกล่าวจะมีกระแสรั่วไหลบริเวณรอยต่อ เรียกว่า กระแสมืด (Dark Current) อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นในช่องว่างบริเวณรอยต่อนี้จะถูกสนามไฟฟ้าของช่องว่างดังกล่าวผลักดันให้อิเล็กตรอนไปอยู่ทางด้านสารเอ็น และผลักดันโฮลไปอยู่ทางด้านสารพี ซึ่งจะทำให้ความกว้างของช่องว่างบริเวณรอยต่อลดลงจนถึงระดับหนึ่งที่อิเล็กตรอนในสารเอ็นสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปรวมกับโฮลในสารพีได้ ทำให้เกิดกระแสไหล เรียกว่า กระแสโฟโต (Photo Current) ดังภาพประกอบ 27 ซึ่งกระแสโฟโตจะแปรเปลี่ยนตามความเข้มแสง ถ้าความเข้มแสงมากขึ้น กระแสจะไหลผ่านโฟโตไดโอดได้มากขึ้น



ภาพประกอบ 27 แสดงอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่เข้าไปในเขตปลอดพาหะเกิดเป็นกระแสโฟโต

เมื่อทำการทดลองให้โฟโตไดโอดรับแสงที่ความเข้มต่างๆ จะวัดค่ากระแส (I_λ) เทียบกับ ความเข้มแสง (f_c) และวัดค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับ (V_λ) นำค่าที่ได้มาเขียนความสัมพันธ์ เป็นกราฟ ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 แสดงความสัมพันธ์ของค่ากระแสกับความเข้มแสงและแรงดันไบแอสย้อนกลับของโฟโตไดโอด

ที่มา: อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และวงจร. (2008). (ออนไลน์).

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1977 เซ็น และดาร์ มิน ฮาวอง (T.T. Chen & Dah Min Hawang) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างเกรตติงโดยใช้หลักการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ 2 แบบ คือ ใช้แสงเลเซอร์ฮีเลียมเนียนกับแผ่นถ่ายภาพ Agfa 10E75 และใช้แสงเลเซอร์อาร์กอนกับแผ่นโฟโตรีซิส Shipley AZ1350 ระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติงควบคุมโดยใช้มุมระหว่าง 2 มุมตกกระทบ มุมที่ใช้ คือ 18.5 องศา ได้ระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง ประมาณ 1 ไมโครเมตร เมื่อนำเกรตติงที่ได้ไปตัดแต่งหน้า และทำการวัดประสิทธิภาพการเลี้ยวเบนได้ 30 เปอร์เซ็นต์ และ 0.72 ไมโครเมตร เมื่อทำการวัดประสิทธิภาพการเลี้ยวเบนได้ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ในปี 1981 แมสซิวและตันชีว (L.Mashev & S.Tonchev) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างเกรตติงโดยใช้หลักการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ ลงบนแผ่นโฟโตรีซิส Shipley AZ-1350 แบบบวก (Positive) และได้วิเคราะห์ถึงความหนาของวัสดุรองรับที่มีผลต่อการกระจายความเข้มของแสง

ในปี 1998 ฟิวโลและกันเกอร์ (L J Fellows & S Gungor) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการผลิตแผ่นโฟโตรีซิสสำหรับเกรตติง จากการสร้างเกรตติงโดยใช้หลักการแทรกสอดของแสงลงบนแผ่นโฟโตรีซิส Ti-6Al-4V เกรตติงที่สร้างมีจำนวน 1,200 ร่องต่อมิลลิเมตร และได้มีการย้อมสีแผ่นโฟโตรีซิส เพื่อลดปัญหาการสะท้อนของคลื่นนิ่งในแผ่นโฟโตรีซิส ซึ่งแผ่นโฟโตรีซิสที่นำมาใช้สร้างเกรตติงต้องมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ

ในปี 2002 คอสติวคีวิช (S.A.Kostyukevych) และคนอื่นๆ ได้ทำการสร้างโฮโลกราฟฟิคเกรตติงลงบนแผ่นโฟโตรีซิส As_2S_3 และศึกษาการแปรเปลี่ยนของรูปโครงสร้างของร่องโดยการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการเลี้ยวเบน และความสัมพันธ์ของเส้นโค้งประสิทธิภาพ (ในความเข้มของการเลี้ยวเบน) กับรูปร่างของร่องบนผิวหน้าของเกรตติง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย มีดังนี้

1. การกำหนดอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
2. ขั้นตอนการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่าน
3. การวิเคราะห์ข้อมูลและการตรวจสอบความถูกต้อง

การกำหนดอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน ประกอบด้วย

1. โต๊ะแสง (Optical Table) เป็นอุปกรณ์ที่มีพื้นโต๊ะเป็นแม่เหล็ก ระหว่างพื้นโต๊ะกับขาโต๊ะรองด้วยลูกยางเพื่อป้องกันการสั่นสะเทือน พื้นโต๊ะมีขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 2 เมตร และขาโต๊ะสูง 0.80 เมตร
2. เครื่องส่งกำลัง (Power Supply) ยี่ห้อ Phywe เป็นอุปกรณ์ที่ให้กำลังเลเซอร์ 5 มิลลิวัตต์ มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 230 โวลต์ พร้อมทั้งอุปกรณ์สำหรับตั้งเวลาในการถ่ายภาพ
3. ท่อลำแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนพร้อมที่ยึด (Holder) ให้กำลัง 5 มิลลิวัตต์ มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร
4. รูปิดเปิดแสง (Shutter) พร้อมที่ยึด เป็นรูสำหรับปิดและเปิดให้ลำแสงส่องผ่านอัตโนมัติตามเวลาที่ตั้งไว้
5. เลนส์นูนขนาด 15 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับรวมแสงและปรับลำแสงให้เป็นลำขนาน
6. รูเข็ม (Pinhole) มีขนาด 30 ไมโครเมตร พร้อมที่ยึด เป็นรูที่ใช้รวมความเข้มแสงความเล็กของรูเข็มจะได้ลำแสงที่ชัด
7. กระจกแยกลำแสง (Beam Splitter Mirror) มีขนาดกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร ลักษณะเป็นแก้วใสผิวหน้าเรียบเคลือบด้วยอลูมิเนียมบางๆ เพื่อให้ลำแสงส่องผ่านและสะท้อนในปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์เท่ากัน
8. กระจกราบ (Plane Mirror) มีขนาดกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร เป็นอุปกรณ์สำหรับให้แสงเลเซอร์มาตกกระทบและสะท้อนออกไป
9. แผ่นพลาสติกวงกลมทึบแสงสีดำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร มีรูตรงกลางขนาด 1,000 ไมโครเมตร เพื่อให้แสงส่องผ่าน เป็นการรวมแสงและปรับลำแสงให้ขนาน

10. แผ่นโฟโตรีซิส (Photoresist) เป็นแผ่นฟิล์มยี่ห้อ Slavich ชื่อ PFG-01 ซึ่งไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร

11. เครื่องให้กำเนิดแสงสีเขียว (Green Light) ยี่ห้อ Kaiser รุ่น Dunkelkammer leuchte 4018 มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 230 โวลต์ ใช้เป็นแสงสว่างในห้องมืด

12. จากรับพร้อมที่ยึด ประกอบด้วยแผ่นแก้ว 2 แผ่น มีขนาดกว้าง 120 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร วางประกบกัน เพื่อใช้ใส่แผ่นฟิล์มสำหรับการบันทึก

13. ที่จับยึดเลนส์และรูเข็ม พร้อมปุ่มสำหรับเลื่อนปรับตำแหน่งของเลนส์และรูเข็ม

14. อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับล้างฟิล์ม

14.1 ที่คีบ เป็นอุปกรณ์โลหะสำหรับใช้ยึดจับแผ่นฟิล์มระหว่างทำการล้างฟิล์ม

14.2 หลอดหยด

14.3 เข็มฉีดยา ขนาด 6 มิลลิลิตร

14.4 กระจกตวงขนาด 15 มิลลิลิตร

14.5 บีกเกอร์ ขนาด 600 และ 1,000 มิลลิลิตร

14.6 เครื่องชั่งอ่านค่าได้ละเอียด 3 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น SNR

NO3702 FNR 3365015104

14.7 ถาดพลาสติก ใช้สำหรับใส่น้ำยาเพื่อล้างฟิล์ม

14.8 โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)

14.9 สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) มีความเข้มข้น 95-98 เปอร์เซ็นต์

14.10 น้ำยาสร้างภาพ (Developer Agent) ยี่ห้อ Fuji ชนิด XD-25

14.11 น้ำยาหยุดภาพ (Stop Bath Agent) ยี่ห้อ Tetenal

14.12 น้ำยาฟอกขาว (Bleaching Agent)

14.13 น้ำยาล้างฟิล์ม (Wetting Agent) ยี่ห้อ Agfa

ขั้นตอนการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่าน

ทำการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่าน โดยใช้หลักการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ ขั้นตอนในการสร้างเกรตติงแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนการสร้างลวดลายการแทรกสอดและการบันทึกลงบนแผ่นฟิล์ม

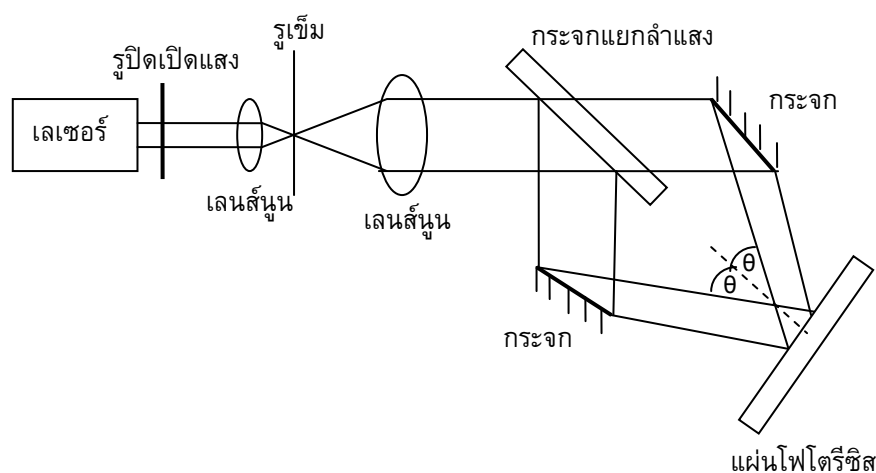
การสร้างลวดลายการแทรกสอดและการบันทึกลงบนแผ่นฟิล์ม จัดอุปกรณ์ดังภาพประกอบ 29 มีขั้นตอนดังนี้

- 1.1 ปรับลำแสงเลเซอร์ให้อยู่ในแนวขนานและตรงกับรูเปิดแสง
- 1.2 ใส่แผ่นพลาสติกวงกลมสีดำที่มีรู 1,000 ไมโครเมตร ตรงที่จับยึดเลนส์และรูเข็มปรับลำแสงให้ส่องผ่านรูทั้งสองเพื่อปรับลำแสงให้เป็นลำขนาน
- 1.3 ใส่เลนส์ขนานขนาด 15 มิลลิเมตร และรูเข็มขนาด 30 ไมโครเมตร แทนพลาสติกวงกลมสีดำ ตามลำดับ
- 1.4 ปรับลำแสงให้ผ่านเลนส์ขนานและผ่านรูเข็ม ลำแสงที่ผ่านรูเข็มออกมาต้องเป็นลำแสงที่สะอาด (Clean Laser Beam) คือ ต้องไม่เกิดเป็นริ้ว (Fringe) หรือเป็นจุดต่างดำ (Mottle) ทำโดยการเลื่อนรูเข็มไปที่ตำแหน่ง 15 มิลลิเมตรจากเลนส์ ระนาบโฟกัสเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของเลนส์ ค่อยๆ ปรับตำแหน่งของเลนส์และรูเข็มอย่างช้าๆ และระยะทางสั้นๆ ใช้เลนส์รวมแสงให้เป็นจุดเล็กบนรูเข็มจนมีทิศทางที่แน่นอน แล้วปรับเปลี่ยนตำแหน่งของรูเข็มจนกระทั่งแสงเลเซอร์สามารถผ่านรูเข็มได้ตลอดและกระจายออกไป ความเล็กของรูเข็มจะได้ลำแสงที่ชัด
- 1.5 ปรับให้เป็นลำแสงขนาน (Collimate) ด้วยเลนส์ขนานขนาด 100 มิลลิเมตร และส่งไปยังกระจกแยกลำแสง ซึ่งแยกลำแสงออกเป็นสองลำแสงตั้งฉากกัน
- 1.6 นำกระจกราบที่มีคุณสมบัติสะท้อนแสง มารับลำแสงทั้งสองที่ผ่านกระจกแยกลำแสง และปรับกระจกให้ลำแสงทั้งสองมาพบกันเพื่อให้เกิดการแทรกสอดของแสง โดยคำนวณหาระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแถบสว่างสองแถบที่อยู่ติดกัน จากสมการ
$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$
- 1.7 วัดค่ามุม θ ระหว่างสองลำแสง และบันทึกระยะทางระหว่างกระจกแยกลำแสงกับกระจกราบ และระยะทางระหว่างกระจกราบกับฉากรับ (Recording Plate) เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความกว้างของ d จากการทดลองการเลี้ยวเบนของแสงเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี
- 1.8 ตั้งเวลาในการถ่ายภาพที่เครื่องส่งกำลัง โดยเลื่อนแถบตั้งเวลาไว้ที่ 5 วินาที
- 1.9 ใช้แสงเขียวสำหรับการส่องสว่าง นำแผ่นฟิล์มโพโตรีซิส PFG-01 ใส่ลงในฉากรับระหว่างแผ่นแก้วสองแผ่น โดยหันด้านที่ไวต่อการถ่ายภาพ (Photosensitive) เข้าหาแสงเลเซอร์ และใช้คลิปหนีบให้แน่น เพื่อหลีกเลี่ยงการสะท้อนหลายครั้งระหว่างแผ่นแก้ว และทิ้งไว้

ประมาณ 1–2 นาที เพื่อให้ความกดดันและอุณหภูมิสมดุลทั่วบริเวณระหว่างแผ่นฟิล์มโพโตรีซิส และแผ่นแก้ว

1.10 บันทึกผลลดลายการแทรกสอดของลำแสงลงบนแผ่นฟิล์มโพโตรีซิส

1.11 นำแผ่นฟิล์มโพโตรีซิส PFG-01 ไปล้างในห้องมืดกับน้ำยาเคมี



ภาพประกอบ 29 แสดงการทดลองการสร้างลดลายการแทรกสอดและการบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มโพโตรีซิส

2. ขั้นตอนการเตรียมน้ำยาล้างฟิล์ม

2.1 เตรียมน้ำยาสร้างภาพ (Developer Agent) โดยใช้ น้ำยาสร้างภาพ 1 ส่วน ผสมกับน้ำประปา 4 ส่วน แล้วใส่ลงในภาตพลาสติกใบที่ 1

2.2 เตรียมน้ำยาหยุดภาพ (Stop Bath Agent) โดยใช้ น้ำยาหยุดภาพ 12 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำประปา 468 มิลลิลิตร แล้วใส่ลงในภาตพลาสติกใบที่ 2

2.3 เตรียมน้ำยาฟอกขาว (Bleaching Agent) โดยใช้ สารโพแทสเซียมไดโครเมต 5 กรัม ผสมกับน้ำประปา 1,000 มิลลิลิตร แล้วใส่สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาณ 5 มิลลิลิตรผสมลงไป แล้วใส่ลงในภาตพลาสติกใบที่ 3

2.4 เตรียมน้ำยาล้างฟิล์ม (Wetting Agent) โดยหยดน้ำยาล้างฟิล์ม 3–4 หยด ลงไปในน้ำประปา 500 มิลลิลิตร แล้วใส่ลงในภาตพลาสติกใบที่ 4

3. ขั้นตอนการล้างฟิล์ม

ขั้นตอนการล้างฟิล์มต้องปฏิบัติในห้องมืดใช้เพียงแสงเขียวในการให้ความสว่างเท่านั้น โดยมีขั้นตอนการล้างฟิล์ม ดังนี้

3.1 นำแผ่นฟิล์มโพโตรีซิส PFG-01 ที่ได้ถูกบันทึกลดทอนการแทรกสอดไว้แล้วมาจุ่มลงในถาดพลาสติกใบที่ 1 ให้ด้านที่ไวต่อการถ่ายภาพหงายขึ้น เป็นเวลาประมาณ 2 นาที

3.2 นำแผ่นฟิล์มโพโตรีซิส PFG-01 มาจุ่มลงในถาดพลาสติกใบที่ 2 แช่ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 30 วินาที

3.3 นำแผ่นฟิล์มโพโตรีซิส PFG-01 มาจุ่มลงในถาดพลาสติกใบที่ 3 แช่ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 1-2 นาที

3.4 นำแผ่นฟิล์มโพโตรีซิส PFG-01 ไปล้างผ่านน้ำประปาเป็นเวลาประมาณ 5 นาที

3.5 นำแผ่นฟิล์มโพโตรีซิส PFG-01 มาจุ่มลงในถาดพลาสติกใบที่ 4 แช่ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2 นาที แล้วผึ่งแผ่นฟิล์มให้แห้ง

แผ่นฟิล์มโพโตรีซิส PFG-01 ที่ได้จะเต็มไปด้วยลดทอนการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ที่มีแถบมืดและแถบสว่างที่มีความกว้างของแถบเท่ากัน ความกว้างของแถบขึ้นอยู่กับมุม θ บริเวณที่เป็นแถบมืดเป็นเหมือนกับร่องที่แสงไม่สามารถส่งผ่านได้ส่วนบริเวณแถบสว่างเป็นเหมือนกับร่องที่แสงสามารถส่งผ่านได้ เรียกแผ่นฟิล์มนี้ว่า โฮโลกราฟฟิคเกรตติงระนาบแบบส่งผ่าน

การวิเคราะห์ข้อมูลและการตรวจสอบความถูกต้อง

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลและตรวจสอบความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือของโฮโลกราฟฟิคเกรตติงระนาบแบบส่งผ่าน มีดังนี้

1. คำนวณหาระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง d จากการวัดการเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่หนึ่ง โดยใช้ชุดการทดลองเรื่องการเลี้ยวเบนของแสง ดังภาพประกอบ 30 มีขั้นตอนดังนี้

1.1 วัดค่าระยะทางระหว่างตำแหน่งของแผ่นเกรตติงกับแผ่นกราฟแทนด้วย P

1.2 วัดค่าระยะทางที่แสงเกิดการเลี้ยวเบนในอันดับที่หนึ่ง บนแผ่นกราฟทั้งซ้ายและขวา แทนด้วย Q ซึ่งมีค่าเท่ากันทั้งสองข้าง

1.3 คำนวณหาระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง จากสมการ (43)

$$d \sin \theta = m\lambda$$

จะได้

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d} \quad (52)$$

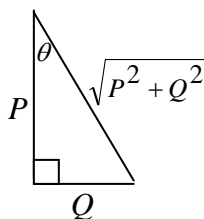
เมื่อ

$$m = 1$$

ดังนั้น

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{d} \quad (53)$$

จากภาพประกอบ 27 จะได้



แทนค่าลงในสมการ (53)

$$\frac{Q}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{\lambda}{d}$$

นั่นคือ จะได้ค่า d จากการวัดการทดลองการเลี้ยวเบนของแสง

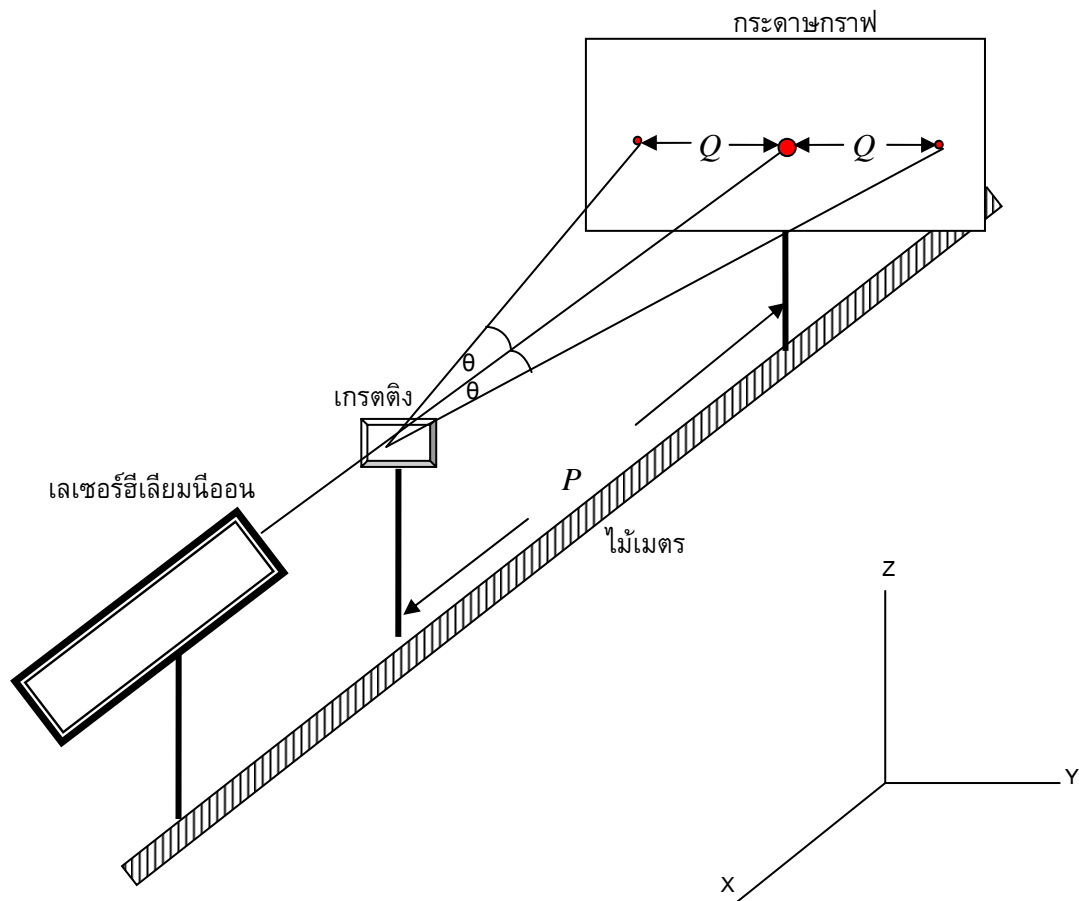
$$d = \frac{\lambda}{Q} \times \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (54)$$

2. นำค่า d ที่คำนวณได้จากการวัดไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี

จากสมการ
$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

3. คำนวณหาจำนวนร่องของเกรตติง จากสมการ
$$N = \frac{1}{d}$$

4. หาประสิทธิภาพของเกรตติง โดยการวัดความเข้มแสงที่ผ่านเกรตติงแล้วเกิดการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง เทียบกับความเข้มแสงที่ไม่ได้ผ่านเกรตติง



ภาพประกอบ 30 แสดงการทดลองเรื่องการเลี้ยวเบนของแสง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่องผ่าน

ในงานวิจัยได้สร้างเกรตติงระนาบแบบส่องผ่าน โดยใช้หลักการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนลงบนแผ่นฟิล์ม PFG-01 แสดงดังภาพประกอบ 29 ค่ามุม θ ระหว่างสองลำแสงเป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง d แสดงดังตาราง 1 ระยะห่างระหว่างรูเข็มกับเลนส์นูนต้องมีค่าเท่ากับความยาวโฟกัสของเลนส์นูน คือ 10 เซนติเมตร จึงจะได้ลำแสงขนาน กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเลนส์นูนกับกระจกแยกลำแสงมีค่าคงที่ คือ 15 เซนติเมตร และกำหนดค่ามุม θ เท่ากับ 10, 15 และ 18 องศา ตามลำดับ จะได้ระยะทางจากกระจกแยกลำแสงกับกระจกรับ และระยะทางจากกระจกรับกับฉากรับเปลี่ยนแปลงไปตามค่ามุม θ เมื่อมุม θ มีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่า d มีค่าน้อยลงซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีในการคำนวณหาระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติงตามสมการ (51) คือ

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและตรวจสอบความถูกต้องของเกรตติงที่สร้างขึ้น

1. ผลการวัดระยะทางที่แสงเลี้ยวเบนห่างจากแนวกลาง ($m=0$) กับการเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่หนึ่ง ($m=\pm 1$) แทนด้วย Q และวัดระยะทางระหว่างเกรตติงถึงกระดาษกราฟ แทนด้วย P แสดงดังภาพประกอบ 31 และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า d แสดงดังตาราง 2 โดยใช้สมการ (54) ในการคำนวณหาค่า d คือ

$$d = \frac{\lambda}{Q} \times \sqrt{P^2 + Q^2}$$

และคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน δd จากสมการ

$$\delta d = \sqrt{(\delta d_p)^2 + (\delta d_q)^2}$$

ตัวอย่างเช่น ค่าความคลาดเคลื่อน δd จากมุม θ ระหว่างสองลำแสง 10 องศา จะได้

$$\delta d_p = d \begin{matrix} (P = 10.03) \\ (Q = 3.34) \end{matrix} - d \begin{matrix} (P = 10.00) \\ (Q = 3.34) \end{matrix}$$

$$\delta d_q = d \begin{matrix} (P = 10.00) \\ (Q = 3.37) \end{matrix} - d \begin{matrix} (P = 10.00) \\ (Q = 3.34) \end{matrix}$$

นำค่า P และ Q ไปแทนในสมการ (54) จะได้

$$d_p = \frac{632.8 \times 10^{-9}}{3.34 \times 10^{-3}} \times \sqrt{(10.03)^2 + (3.34)^2} \times 10^{-3} = 2002.8868 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$d_p = \frac{632.8 \times 10^{-9}}{3.34 \times 10^{-3}} \times \sqrt{(10.00)^2 + (3.34)^2} \times 10^{-3} = 1997.4949 \times 10^{-9} \text{ m}$$

ดังนั้น $\delta d_p = 2002.8868 - 1997.4949 = 5.3919 \times 10^{-9} \text{ m}$

$$d_q = \frac{632.8 \times 10^{-9}}{3.37 \times 10^{-3}} \times \sqrt{(10.00)^2 + (3.37)^2} \times 10^{-3} = 1981.5048 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$d_q = \frac{632.8 \times 10^{-9}}{3.34 \times 10^{-3}} \times \sqrt{(10.00)^2 + (3.34)^2} \times 10^{-3} = 1997.4949 \times 10^{-9} \text{ m}$$

ดังนั้น $\delta d_q = 1997.4949 - 1981.5048 = 15.9901 \times 10^{-9} \text{ m}$

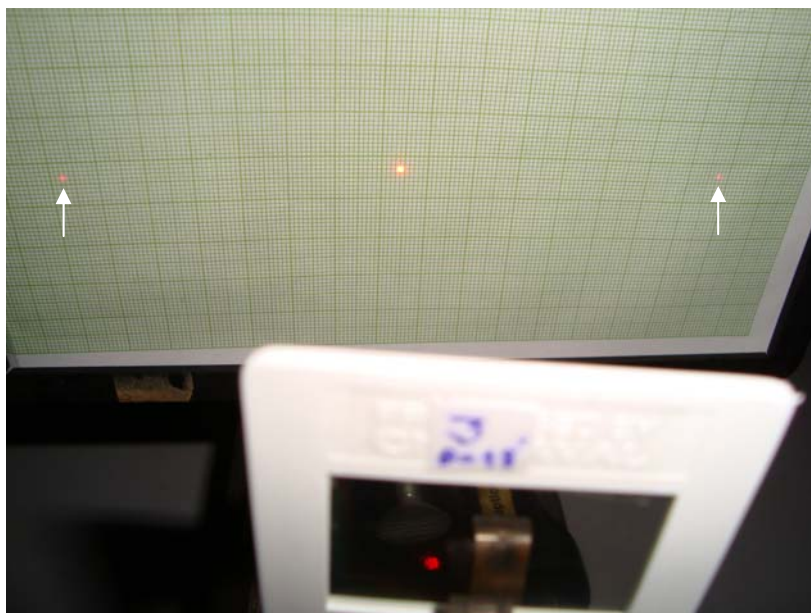
คำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน δd

$$\delta d \approx \sqrt{(5.39)^2 + (15.99)^2} \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\approx 16.87 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\approx 0.02 \text{ } \mu\text{m}$$

นำค่า δd ที่ได้ไปคูณกับ 2 เนื่องจาก ใช้ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าความคลาดเคลื่อน $\delta d = 0.02 \times 2 = 0.04 \text{ } \mu\text{m}$



ภาพประกอบ 31 แสดงแสงผ่านเกรตติงแล้วเกิดการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง

ผลการเปรียบเทียบค่า d ที่คำนวณได้จากการวัดกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี แสดงดังตาราง 3 จะเห็นได้ว่า ค่า d ที่คำนวณได้จากการวัดกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี มีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 11.48% และมีความคลาดเคลื่อนต่ำสุด 6.86% จากการใช้มุม θ ระหว่างสองลำแสง 15 องศา และ 18 องศา ตามลำดับ

นำค่า d ที่ได้ไปคำนวณหาจำนวนร่องของเกรตติงที่สร้างขึ้น และเปรียบเทียบกับจำนวนร่องที่ควรได้ตามทฤษฎี แสดงดังตาราง 4 เมื่อเปรียบเทียบจำนวนร่องของเกรตติงจากการทดลองกับทฤษฎีพบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 9.78% และมีความคลาดเคลื่อนต่ำสุด 5.73% จากการใช้มุม θ ระหว่างสองลำแสง 15 องศา และ 18 องศา ตามลำดับ โดยคำนวณหาจำนวนร่องของเกรตติงจากสมการ

$$N = \frac{1}{d}$$

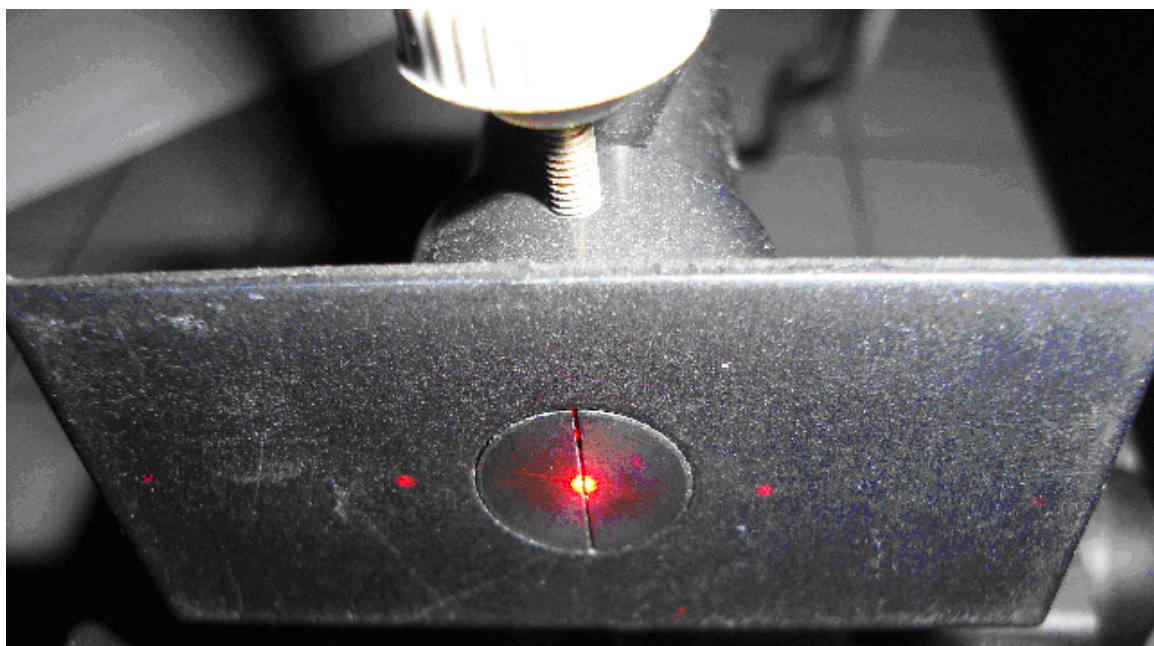
2. ผลการวัดความเข้มแสงที่ผ่านเกรตติงแล้วเกิดการเลี้ยวเบนที่อันดับต่างๆ โดยใช้ไฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แสดงดังภาพประกอบ 32 แล้วทำ

การวัดความเข้มแสงที่เลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง เทียบกับความเข้มแสงที่ไม่ได้ผ่านเกรตติง นำค่าความเข้มแสงที่วัดได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพของการเลี้ยวเบน (η) จากสมการ

$$\eta = \frac{I}{I_0}$$

เมื่อ I คือ ความเข้มแสงของการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง
 I_0 คือ ความเข้มแสงที่ไม่ได้ผ่านเกรตติง

ผลการวัดความเข้มแสงแสดงดังตาราง 5 พบว่า เกรตติงที่สร้างขึ้นจากมุม θ ระหว่างสองลำแสงเป็น 10 องศา, 15 องศา และ 18 องศา มีประสิทธิภาพของการเลี้ยวเบนสูงสุด (ในความเข้มของการเลี้ยวเบน) เป็น 1.9, 2.0 และ 2.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพประกอบ 32 แสดงแสงผ่านเกรตติงแล้วเกิดการเลี้ยวเบนตกกระทบบนอุปกรณ์รับแสง

ตาราง 1 แสดงผลการวัดค่ามุม θ ระหว่างสองลำแสง และนำไปคำนวณหาระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติงตามทฤษฎี

มุม θ ระหว่าง สองลำแสง (องศา)	ระยะทางจาก รูเข็มถึงเลนส์ นูนขนาด 100 mm (cm)	ระยะทางจาก เลนส์นูน 100 mm ถึง กระจก แยกลำแสง (cm)	ระยะทางจาก กระจกแยก ลำแสงถึงกระจก ราบ (cm)	ระยะทาง จากกระจก ราบถึงฉาก รับ (cm)	ระยะห่าง ระหว่างร่อง ของเกรตติง จากทฤษฎี (μm)
10.0	10.0	15.0	10.0	41.5	1.82
15.0	10.0	15.0	14.5	39.5	1.22
18.0	10.0	15.0	16.0	39.0	1.02

ตาราง 2 แสดงผลการวัดระยะทางที่แสงเลี้ยวเบนห่างจากแนวกลาง กับการเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่หนึ่ง และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า d

มุม θ ระหว่าง สองลำแสง (องศา)	ชั้นที่	ระยะทาง ระหว่าง เกรตติงกับ แผ่นกราฟ (P) (cm)	ระยะทางที่แสงเลี้ยวเบนห่างจากแนวกลาง กับการเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่หนึ่ง (Q) (cm)				ค่า Q เฉลี่ย (cm)	ค่า d จากการทดลอง (μm)
			$m = 1$		$m = -1$			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
10.0	1	10.0 ± 0.03	3.40	3.40	3.35	3.35	3.34 ± 0.06	2.00 ± 0.04
	2	10.0 ± 0.03	3.30	3.30	3.30	3.30		
15.0	1	10.0 ± 0.03	5.30	5.30	5.25	5.25	5.29 ± 0.12	1.36 ± 0.02
	2	10.0 ± 0.03	5.20	5.20	5.40	5.40		
18.0	1	10.0 ± 0.03	7.30	7.30	7.50	7.50	7.16 ± 0.18	1.09 ± 0.02
	2	10.0 ± 0.03	7.00	7.00	6.83	6.83		

ตาราง 3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า d ที่คำนวณได้จากการวัดกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี

มุม θ ระหว่าง สองลำแสง (องศา)	ชั้นที่	ค่า d ที่ คำนวณได้จาก การวัด (μm)	ค่า d ที่ คำนวณได้จาก ทฤษฎี (μm)	ค่าความคลาด เคลื่อน (%)
10.0	1	2.00 ± 0.04	1.82	9.89
	2			
15.0	1	1.36 ± 0.02	1.22	11.48
	2			
18.0	1	1.09 ± 0.02	1.02	6.86
	2			

ตาราง 4 แสดงผลการคำนวณจำนวนร่องของเกรตติงที่สร้างขึ้น เปรียบเทียบกับจำนวนร่องที่
คำนวณได้ตามทฤษฎี

มุม θ ระหว่าง สองลำแสง (องศา)	ชั้นที่	จำนวนร่องของ เกรตติงที่สร้างขึ้น (ร่อง/mm)	จำนวนร่องของ เกรตติงตาม ทฤษฎี (ร่อง/mm)	ค่าความคลาด เคลื่อน (%)
10.0	1	500	549	8.93
	2			
15.0	1	738	818	9.78
	2			
18.0	1	922	978	5.73
	2			

ตาราง 5 แสดงผลการวัดความเข้มแสงที่ผ่านเกรตติงแล้วเกิดการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง เทียบกับความเข้มแสงที่ไม่ได้ผ่านเกรตติง โดยใช้โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

มุม θ ระหว่าง สองลำแสง (องศา)	ความเข้มแสงที่ไม่ได้ ผ่านเกรตติง (Volts)				ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่ ไม่ได้ผ่านเกรตติง (Volts)	ความเข้มแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง อันดับที่หนึ่ง (Volts)				ค่าเฉลี่ยความเข้มแสง ที่เลี้ยวเบนผ่าน เกรตติงอันดับที่หนึ่ง (Volts)	ประสิทธิภาพ ของการ เลี้ยวเบน (%)
	1	2	3	4		1	2	3	4		
10.0	0.50	0.49	0.50	0.50	0.498 ± 0.012	0.009	0.009	0.010	0.010	0.0095 ± 0.0013	1.9
15.0	0.50	0.50	0.49	0.49	0.495 ± 0.013	0.010	0.010	0.009	0.010	0.0098 ± 0.0013	2.0
18.0	0.49	0.49	0.50	0.50	0.495 ± 0.013	0.010	0.011	0.010	0.010	0.0103 ± 0.0012	2.1

บทที่ 5

สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยการแทรกสอดของลำแสงเลเซอร์ ได้ข้อสรุปดังนี้

1. ค่าของมุม θ ระหว่างสองลำแสงเป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง d และจำนวนร่องของเกรตติง N เมื่อมุม θ มีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่า d มีค่าน้อยลงแต่จำนวนร่องของเกรตติง N มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีในการคำนวณหาระยะห่างระหว่างร่องและจำนวนร่องของเกรตติง ค่า d และ N ที่คำนวณได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี

2. ผลการวัดความเข้มแสงของเกรตติง พบว่า ความเข้มแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงอันดับที่หนึ่ง จากเกรตติงแต่ละอันมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของการเลี้ยวเบนของเกรตติง (ในความเข้มของการเลี้ยวเบน) ก็ให้ผลที่มีค่าใกล้เคียงกัน

อภิปรายผลการทดลอง

จากการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยการแทรกสอดของลำแสงเลเซอร์ สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

1. ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง d ที่คำนวณได้จากการทดลองเทียบกับทฤษฎี อาจเป็นผลมาจากการวัดค่ามุม θ ระหว่างสองลำแสงที่อาจคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องในการคำนวณหาค่า d และคำนวณหาจำนวนร่องของเกรตติง N ที่สร้างขึ้น

2. ความเข้มแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนร่องของเกรตติง จึงทำให้ได้ค่าความเข้มแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงแต่ละอันมีค่าใกล้เคียงกัน

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเทคนิคการสร้างเกรตติงระนาบแบบส่งผ่านโดยการแทรกสอดของลำแสงเลเซอร์ มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. การบันทึกรูปแบบการแทรกสอดของลำแสงเลเซอร์ แสงที่ได้ต้องเป็นลำแสงขนาน มีความสม่ำเสมอของลำแสงและไม่เกิดริ้ว และอุณหภูมิควรคงที่ขณะทำการทดลอง เนื่องจากจะส่งผลให้รูปแบบของการแทรกสอดของแสงไม่สม่ำเสมอ และส่งผลต่อความถูกต้องของเกรตติงที่สร้าง

2. เกรตติงที่สร้างขึ้น สามารถนำไปตัดแต่งหน้า (Blazed) โดยการยิงด้วยไอออน (Ion Etching) จะทำให้มีประสิทธิภาพการเลี้ยวเบน (ในความเข้มของการเลี้ยวเบน) เพิ่มขึ้นตามต้องการ

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2545). *ฟิสิกส์ 2*. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิรมล พัฒนสุวรรณ; และคนอื่นๆ. (2543). *ฟิสิกส์เบื้องต้น*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- บดินทร์ชาติ สุขบท. (2546). *ฟิสิกส์ 1*. ปทุมธานี: สกายบุ๊กส์.
- บุรินทร์ วัชรสินธุ์; และคนอื่นๆ. (2540). *ฟิสิกส์ 2*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรเมษฐ์ ปัญญาเหล็ก. (2542). *ฟิสิกส์ 1*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: พิมพ์พรรณการพิมพ์.
- วิลสัน, เจ; และ เฮาคีส์, เจ เอฟ บี. (2544). *เลเซอร์ทฤษฎีและการประยุกต์*. แปลโดย สุรพล รักวิชัย. กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชนา.
- สุรพล รักวิชัย. (2541). *ฟิสิกส์ 2 สำหรับวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สมพงษ์ ใจดี. (2542). *ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 4*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ ทบวงมหาวิทยาลัย. (2543). *ฟิสิกส์ เล่ม 2*. ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และวงจร. (2551). สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2551, จาก <http://www.freewebs.com/epowerdata/epower2007/subject/Electronics/UNIT7.pdf>
- Chen, T.T.; & Hawang, Dah Min. (1977, February 15). *Grating Fabrication by Interference of Laser Beams*. Chinese Journal of Physics. 15(1): 6-9. Retrieved June 26, 2006, from <http://psroc.phys.ntu.edu.tw/cjp/download.php?d=1&pid=1671>
- Dylewicz, R.; et al. (2005). *Holographic Lithography for Grating Coupler Fabrication in Gallium Nitride Grown on Sapphire Substrate*. International Students and Young Scientists Workshop. 11(17). Retrieved December 19, 2006, from <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10760/33905/01617790.pdf?isnumber=33905>
- Fellows, L.J.; & Gungor, S. (1998, September 17). *Fabrication of Photoresist Diffraction Gratings on Ti-6Al-4V Beam Specimens for use in Moireinterferometry*. Measurement Science and Technology. 12: 1-2. Retrieved December 19, 2006, from <http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-0233/9/12/006>

- Fitzpatrick, Richard. (2003). *Electromagnetism and Optics*. New York: Thomson-Brooks Cole. Retrieved December 21, 2006, from <http://www.thomsonedu.com>
- Hecht, Eugene. (2002). *Optics*. 4th ed. New York: Addison-Wesley.
- Jenkins, Francis A.; & White, Harvey E. (1987). *Fundamentals of Optics*. 4th ed. California: McGraw-Hill.
- Kostyukevych, S.A.; et al. (2006, February 17). *Fabrication of Holographic Diffraction Gratings Based on As₂S₃ Layers*. Technical Physics. 48(1): 1-3. Retrieved January 23, 2007, from <http://www.springerlink.com/content/217184w284q3542q/>
- Mashev, L.; & Tonchev, S. (2004, December 12). *Formation of Holographic Diffraction Gratings in Photoresist*. Applied Physics. 26(3): 1-2. Retrieved January 23, 2007, from <http://www.springerlink.com/content/t9381r85n/04gt5x/>
- Palmer, Christopher. (2002). *Diffraction Grating Handbook*. New York: Thermo RGL. Retrieved June 26, 2006, from http://phys-advlab.physics.lsa.umich.edu/Phys441_442/Atomic%20Spectroscopy/DiffGrating.pdf
- Pedrotti, Frank L.; & Pedrotti, Leno S. (1993). *Introduction to Optics*. 2nd ed. U.S.A.: Prentice-Hall, Inc.
- Sear, Francis Weston. (1964). *Optics*. 3rd ed. Massachusetts: Addison Wesley.
- Smith, F.G.; & Thomson, J.H. (1988). *Optics*. 2nd ed. Manchester: John Wiley & Sons.
- Subrahmanyam, N.; & Lal, Brij. (1984). *A Text Book of Optics*. 14th ed. New Delhi: S. Chand.

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นางสาวสมเสมอ	ชื่อสกุล ทักษิณ
เกิดวันที่ 1	เดือน กรกฎาคม พุทธศักราช 2519
สถานที่เกิด	อำเภอ ปะทิว จังหวัด ชุมพร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	229 หมู่ 10 ต.ชุมโค อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2538	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนปะทิววิทยา จังหวัดชุมพร
พ.ศ. 2542	กศ.บ. วิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยทักษิณ
พ.ศ. 2551	กศ.ม. (สาขาวิชาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ