

อำนาจการแยกแยะของการแทรกสอดสนามใกล้สำหรับการตรวจวัดความเอียงของระนาบ

วันทนา แก้วเอียน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา


คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มิถุนายน 2559

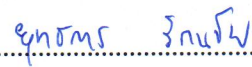
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

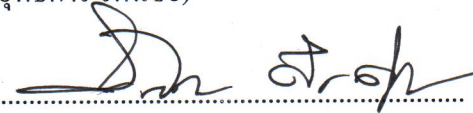
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ วันทนา แก้วเอี่ยม ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

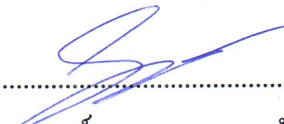
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรไกร ศรีศุภผล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธาน
(ดร.ยุทธการ รัตนชัย)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรไกร ศรีศุภผล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ เดชะปัญญา)


..... กรรมการ
(ดร.ศรัณย์ กิบาลชนม์)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษาของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่ 1 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2559

การวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษา
โครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์
จากสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ระดับปริญญาโท ปีการศึกษา 2556

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ. ดร.สรไกร ศรีสุขผล อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่สนับสนุนทุนการศึกษา และทุนวิจัยตลอดหลักสูตร

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อชู่หะ แก้วเอี่ยม คุณแม่ฉวีลักษณ์ แก้วเอี่ยม น้อง ๆ ญาติ ๆ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ทำให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูแด่เวทีแม่บทการบูรณาการ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

วันทนา แก้วเอี่ยม

56920172: สาขาวิชา: ฟิสิกส์ศึกษา; วท.ม. (ฟิสิกส์ศึกษา)

คำสำคัญ: ปราบกฎการรบกวน / การแทรกสอดสนามใกล้

วันทนา เก้าเอียน: อำนาจการแยกแยะของการแทรกสอดสนามใกล้สำหรับการตรวจวัดความเอียงของระนาบ (RESOLUTION POWER OF NEAR-FIELD INTERFERENCE FOR MEASURING PLANAR INCLINATION) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สร ไกร ศรีสุภผล, วท.ด. 36 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของระยะระหว่างฉากรับแสงกับเกรตติงที่มีต่อรีวรอยการแทรกสอดแบบสนามใกล้ นำไปสู่การประยุกต์ใช้ปราบกฎการรบกวนสำหรับการวัดความลาดเอียงของพื้นผิวที่แสงตกกระทบ โดยอาศัยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และคำนวณความกว้างของแถบสว่างรีวรอยการแทรกสอดบนพื้นผิวที่แสงตกกระทบ โดยกำหนดให้ เกรตติงมีคาบเกรตติงเท่ากับ 50, 100, 150 และ 200 ไมโครเมตร อัตราส่วนช่องเปิดมีค่า 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และความยาวคลื่นแสง 445, 532 และ 635 นาโนเมตร พบว่า การเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างฉากรับแสงกับเกรตติงทำให้ความกว้างของกราฟความเข้มแสงเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ และการเปลี่ยนแปลงความกว้างของแถบสว่างเมื่อใช้คาบของเกรตติง 50 ไมโครเมตร อัตราส่วนช่องเปิด 0.9 และความยาวคลื่นแสง 635 นาโนเมตร สามารถตรวจวัดความเอียงของระนาบได้ค่ามุมน้อยที่สุดถึงระดับไมโครเมตร

56920172: MAJOR: PHYSICS EDUCATION; M.Sc. (PHYSICS EDUCATION)

KEYWORDS: TALBOT EFFECT/NEAR-FIELD INTERFERENCE

WANTHANA KAO-IAN: RESOLUTION POWER OF NEAR-FIELD INTERFERENCE FOR MEASURING PLANAR INCLINATION. ADVISORY COMMITTEE: SORAKRAI SRISUPHAPHON, Ph.D. 36 P. 2016.

Aimed at the influence of the distance between the grating and the screen on the fringes of the near-field interference has been applied for measuring the planar inclination. The width of simulated intensity patterns are obviously changed when the distance between the grating and the screen is varied with small distances. Determine parameters. i.e. the grating period in the range of 50 – 200 μm , the opening fraction in the range of 0.1 – 0.9 and the wavelength of 445, 532 and 635 nm, have been considered. The best sensitivity was obtained for the grating period of 50 μm , the opening fraction of 0.9, and the wavelength of 635 nm, which provides the resolution of the planar inclination in the micrometer scale.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ตัวแปรที่ศึกษา.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
2 เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
ฟังก์ชันคลื่นของการแทรกสอดแบบสนามใกล้เคียง.....	4
พรมของแสงในปรากฏการณ์ทาล์บอด.....	8
การกระจายความเข้มแสงของการแทรกสอด.....	9
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	14
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	14
ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	19

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการดำเนินการวิจัย.....	18
ตอนที่ 1 การศึกษาผลของระยะระหว่างฉากรับแสงและเกรตติง ที่มีต่อความเข้มแสง.....	18
ตอนที่ 2 การศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสง.....	20
5 สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	28
สรุปผลและอภิปรายผล.....	28
ข้อเสนอแนะ.....	29
บรรณานุกรม.....	30
ภาคผนวก.....	31
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	36

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4-1	
เปรียบเทียบความกว้างของกราฟ เมื่อแสงมีความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $d = 200 \text{ }\mu\text{m}$ อัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$ ระยะระหว่างเกรตติง กับฉากรับแสง $z = L_T$ ที่รัศมีลำแสงแบบเกาส์ y มีค่าต่างๆ.....	23
4-2	
เปรียบเทียบความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงที่ค่าคงที่ ของเกรตติง d และค่าอัตราส่วนช่องเปิด f ต่าง ๆ กำหนดมุมเอียง 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 445 นาโนเมตร	24
4-3	
เปรียบเทียบความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงที่ค่าคงที่ ของเกรตติง d และค่าอัตราส่วนช่องเปิด f ต่าง ๆ กำหนดมุมเอียง 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร	25
4-4	
เปรียบเทียบความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงที่ค่าคงที่ ของเกรตติง d และค่าอัตราส่วนช่องเปิด f ต่าง ๆ กำหนดมุมเอียง 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร	26
4-5	
ค่ามุมที่สามารถตรวจวัดได้ เมื่อความแตกต่างความกว้างของกราฟ ความเข้มแสงเป็น 4 ไมโครเมตร และคาบของเกรตติง d ขนาด 50 ไมโครเมตร.....	27

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	แผนผังลักษณะการบานออกของลำแสง.....	5
2-2	แผนผังการเลี้ยวเบนของแสง.....	6
2-3	แผนผังแบบจำลองเมื่อพื้นผิวระนาบทำมุมเอียง θ โดยให้ฉากรับที่ถูกหมุนไปมี จุดหมุนอยู่ที่ระยะหนึ่งทาร์บอด.....	8
2-4	แบบจำลองร็วรอยการแทรกสอดของแสงที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์ทาล์บอด โดยในที่นี้ใช้แสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตรเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงคาบ ขนาด 200 ไมโครเมตร โดยมีอัตราส่วนช่องเปิด และใช้ผลรวมจาก -25 ถึง 25 โดยใช้สมการที่ 2-13 ลวดเสียบกระดาษวางบนผิวน้ำ.....	9
2-5	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับความเข้มแสงเมื่อ $L = 1\text{ m}$ $d = 200 \times 10^{-6}\text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9}\text{ m}$ โดยใช้สมการที่ 2-16.....	10
2-6	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับความเข้มแสงเมื่อ $L = 1 + d\text{ m}$ $d = 200 \times 10^{-6}\text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9}\text{ m}$ โดยใช้สมการ 2-16.....	10
2-7	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับผลต่างของความเข้มแสงเมื่อ $L = 1\text{ m}$ กับ $L = 1 + d\text{ m}$, $d = 200 \times 10^{-6}\text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9}\text{ m}$ โดยใช้สมการที่ 2-16	11
2-8	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับความเข้มแสงที่เกิดจาก $f = 0.5$ ที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_T$ เมื่อ $d = 200 \times 10^{-6}\text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9}\text{ m}$ โดยใช้สมการที่ 2-13.....	12
2-9	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับความเข้มแสงที่เกิดจาก $f = 0.5$ ที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_T + d$ เมื่อ $d = 200 \times 10^{-6}\text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9}\text{ m}$ โดยใช้สมการที่ 2-13.....	12
2-10	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับผลต่างของความเข้มแสงที่เกิดจาก $f = 0.5$ ที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_T$ กับที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_T + d$ เมื่อ $d = 200 \times 10^{-6}\text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9}\text{ m}$ โดยใช้สมการที่ 2-13.....	13
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับผลต่างของความเข้มแสงที่เกิดจาก $f = 0.5$ ที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_T$ กับที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_T - 0.1d$ เมื่อ $d = 200 \times 10^{-6}\text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9}\text{ m}$ โดยใช้สมการที่ 2-13.....	13

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับผลต่างของความเข้มแสง ที่เกิดจาก $f = 0.5$ ที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_T$ กับที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_T - 0.2d$ เมื่อ $d = 200 \times 10^{-6} \text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9} \text{ m}$ โดยใช้สมการที่ 2-13.....	14
4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสง โดยใช้คลื่น มีความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $= 50 \mu\text{m}$ และอัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$ เมื่อ (ก) $z = L_T$ (ข) $z = L_T + 5 \mu\text{m}$ (ค) $z = L_T - 5 \mu\text{m}$ (ง) $z = L_T + 10 \mu\text{m}$ และ (จ) $z = L_T - 10 \mu\text{m}$ จากสมการที่ 2-13.....	19
4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสง โดยใช้แสง ความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $d = 200 \mu\text{m}$ อัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$ และระยะระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสง $z = L_T$ ที่มุมเอียงต่างๆ ดังนี้ (ก) 0 องศา (ข) 0.5 องศา (ค) 1 องศา (ง) 1.5 องศา และ (จ) 2 องศา โดยใช้สมการที่ 2-13 และ 2-14	21
4-3 เปรียบเทียบความแตกต่างของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสง โดยใช้แสงความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $d = 200 \mu\text{m}$ อัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$ และระยะระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสง $z = L_T$ ระหว่าง มุมเอียง 0 องศา กับมุมเอียงต่างๆ ดังนี้ (ก) 0.5 องศา (ข) 1 องศา (ค) 1.5 องศา และ (ง) 2 องศา โดยใช้สมการที่ 2-13 และ 2-14.....	22
4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสง โดยใช้แสง ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงคาบ d ขนาด 50 ไมโครเมตร โดยมีอัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.1$ เมื่อ (ก) มุม 0 องศา และ (ข) มุม 0.2 องศา โดยใช้ สมการที่ 2-13 และ 2-14.....	23
ภาพภาคผนวก-1 คำสั่งการหาความเข้มแสงเฉลี่ย.....	32
ภาพภาคผนวก-2 คำสั่งและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x กับความเข้มแสง.....	33
ภาพภาคผนวก-3 การหาค่า x ที่บริเวณตำแหน่งของความเข้มแสงเฉลี่ย.....	34
ภาพภาคผนวก-4 การคำนวณหาความกว้างของกราฟ.....	35

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การแทรกสอดของแสงเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการรวมกันของคลื่นจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์ตั้งแต่สองแหล่งขึ้นไปเคลื่อนที่มาพบกัน มีผลทำให้บริเวณหนึ่งมีความเข้มแสงมากขึ้นหรือลดลงเกิดเป็นริ้วการแทรกสอด และริ้วรอยการแทรกสอดของแสงนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิทยาศาสตร์ เช่น การหาความยาวคลื่นของแสง การแทรกสอดของแสงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การแทรกสอดแบบสนามไกลและสนามใกล้ ซึ่งการแทรกสอดแบบสนามไกลสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer theory) (สุรศักดิ์ เชียงกา, 2557) ในกรณีนี้ แหล่งกำเนิดแสงจะต้องอยู่ไกลเพียงพอที่จะทำให้หน้าคลื่นของแสงเป็นรังสีขนาน ริ้วรอยการแทรกสอดของแสงจึงสามารถอธิบายได้โดยง่ายจากการแทรกสอดแบบเสริมและแบบหักล้างที่ทำให้เกิดเป็นแถบสว่างและแถบมืดตามลำดับ โดยระยะห่างระหว่างแถบสว่างก็จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อฉากรับแสงเลื่อนห่างออกไป การกระจายความเข้มแสงของการแทรกสอดแบบสนามไกลจึงมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากถ้าฉากรับแสงเลื่อนออกไปเพียงเล็กน้อย หรือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของริ้วรอยถ้าระยะที่ฉากรับแสงเลื่อนออกไปนั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างแถบสว่าง

เมื่อคลื่นจากเข้ามาใกล้แหล่งกำเนิดแสง ทำให้แสงที่ผ่านสลิตไม่เป็นแสงขนาน ซึ่งต้องพิจารณาความโค้งของหน้าคลื่นด้วย จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการเลี้ยวเบนแบบสนามใกล้ ซึ่งอธิบายได้จากการทดลองของเฟรสนเอล ในปี ค.ศ. 1836 เฮนรี ทาล์บอต (William Henry Fox Talbot) ได้ทำการทดลองการแทรกสอดของแสงแบบสนามใกล้ ที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงทำให้เกิดภาพริ้วรอยการแทรกสอดขึ้นหลังเกรตติง โดยมีขนาดของริ้วรอยเท่ากับขนาดของเกรตติงทุกประการ ซึ่งระยะห่างระหว่างเกรตติงและตำแหน่งฉากรับนี้ เรียกว่า ระยะทาล์บอต (L_T) (สรายุทธ เศษะปัญญา, 2552) และเรียกภาพริ้วรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์ทาล์บอตว่า ลวดลายพรหมของแสง อันเนื่องมาจากรูปแบบการกระจายตัวของความเข้มแสงสำหรับสนามใกล้จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยตลอด หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของริ้วรอยอย่างชัดเจนแม้ว่าระยะห่างระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสงจะเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย การเลี้ยวเบนและการแทรกสอดแบบสนามใกล้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง จึงทำให้มีการวิจัยและนำไปประยุกต์ใช้อย่างต่อเนื่อง เช่น ด้านทัศนศาสตร์ ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของพื้นผิว

การวัดอุณหภูมิ การวัดระยะทาง การทำสเปกโตรสโคปี การวัดการสั่นสะเทือนของวัตถุ และทำให้การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์คมชัดมากขึ้น ด้านทัศนศาสตร์ควอนตัมใช้ในการศึกษากลศาสตร์ควอนตัม เช่น หลักการซ้อนทับกันของอิเล็กตรอน อะตอมในโดเมนของพิกัด โดเมนของเวลา เป็นต้น (Deachapunya & Srisuphaphon, 2014) นอกจากนี้ยังใช้ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนแบบสนามใกล้ในการทดลองเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีทวิภาคของอนุภาคระดับอะตอมรวมถึงระดับโมเลกุล

ดังที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อเปลี่ยนระยะห่างจากฉากรับแสงถึงเกรตติง และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอย่างชัดเจน แม้ระยะห่างดังกล่าวเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษารีวิวการแทรกสอดของแสงแบบสนามใกล้และการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ตกกระทบพื้นผิวราบที่มุมเอียงต่าง ๆ โดยการจำลองสถานการณ์จริงด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้การตรวจจับความเอียงของระนาบพื้นผิวได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของระยะระหว่างฉากรับแสงและเกรตติงที่มีต่อความเข้มแสงในการแทรกสอดแบบสนามใกล้
2. เพื่อศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสงในการแทรกสอดแบบสนามใกล้

1.3 ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรต้น ได้แก่ พื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ และระยะจากเกรตติงถึงพื้นผิวราบ

ตัวแปรตาม ได้แก่ รีวิวรอยการแทรกสอด และการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงบนฉากรับแสง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของรีวิวรอยการแทรกสอด และความเข้มแสงของการแทรกสอดแบบสนามใกล้ที่ตกกระทบบนฉากรับแสงที่ระนาบทำมุมต่าง ๆ
2. สามารถนำความรู้ในงานวิจัยไปประยุกต์ใช้กับการตรวจจับความเอียงของระนาบพื้นผิวได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยนี้จะศึกษาผลของระยะของจากรับแสงและพื้นที่รวบรวมทำมุมต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสงในการแทรกสอดแบบสนามใกล้ ด้วยการสร้างแบบจำลองสถานการณ์จริงโดยใช้โปรแกรม Mathematica

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. การแทรกสอดสนามใกล้
2. ปราบฏการณ์ทาล์บอต

บทที่ 2

เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามลำดับต่อไปนี้

2.1 ฟังก์ชันคลื่นของการแทรกสอดแบบสนามใกล้

2.2 พรหมของแสงในปรากฏการณ์ทาล์บอด

2.3 การกระจายความเข้มแสงของการแทรกสอด

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟังก์ชันคลื่นของการแทรกสอดแบบสนามใกล้

ฟังก์ชันคลื่นโดยทั่วไป ที่ใช้แทนคลื่นระนาบที่แผ่ไปในทิศทางใด ๆ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\varphi = A \sin(kx - \omega t) \quad (2-1)$$

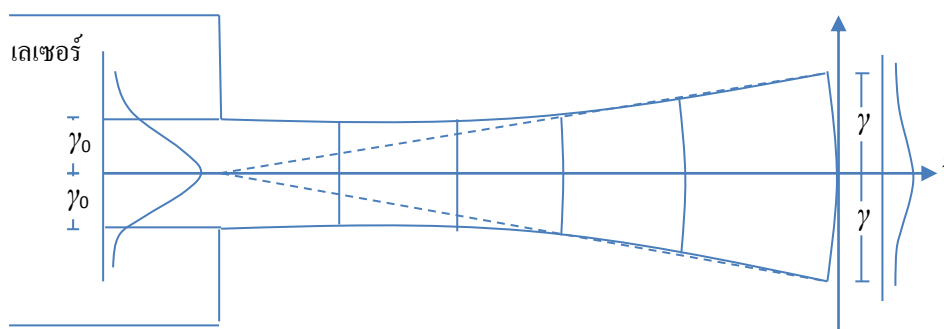
เมื่อ A คือ แอมพลิจูดของคลื่น k คือ เลขคลื่น x คือ การกระจัดของคลื่น ω คือ ความถี่เชิงมุม และ t คือ เวลา นอกจากนี้ สามารถเขียนฟังก์ชันคลื่นตามสมการที่ 2-1 ในรูปสูตรของออยเลอร์ (Euler's formular) ได้เป็น

$$\varphi = Ae^{i(kx - \omega t)} \quad (2-2)$$

จากสมการที่ 2-2 ถ้าพิจารณาคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ไปตามแนวแกน z เมื่อเวลา $t=0$ การกระจัดของคลื่นจะอยู่ในรูป

$$\varphi = Ae^{ikx} \quad (2-3)$$

เมื่อคลื่นแสงเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด ตามปกติลำแสงโดยทั่วไปจะมีการบานออกเป็นรูปกรวย ยิ่งไกลออกไปความเข้มแสงจะยิ่งลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งหายไปที่สุดในกรณีของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นเลเซอร์นั้น ด้วยคุณสมบัติของเลเซอร์ การบานออกของลำแสงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงอื่น ๆ หากพิจารณาลักษณะการบานออกของลำแสงมีรูปแบบลำแสงแบบเกาส์ (Gaussian beam) ดังภาพที่ 2-1 กำหนดให้ เมื่อแสงเดินทางที่ออกจากแหล่งกำเนิด รัศมีลำแสงแบบเกาส์ของเลเซอร์เป็น γ_0 เมื่อแสงเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่ง $z = 0$ รัศมีลำแสงแบบเกาส์มีค่าเป็น γ

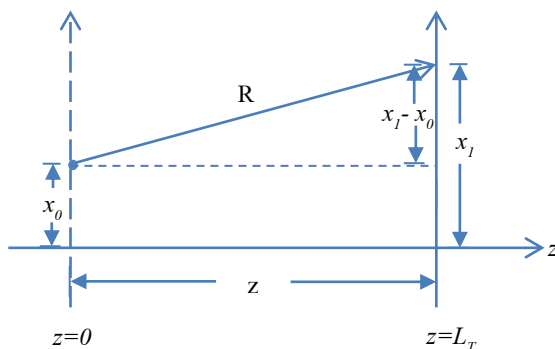


ภาพที่ 2-1 แผนผังลักษณะการบานออกของลำแสง

ถ้าสมมติให้แสงความยาวคลื่น λ หรือมีเลขคลื่น $k = 2\pi / \lambda$ เคลื่อนที่ตามแนวแกน z เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงที่ตำแหน่ง $z = 0$ โดยให้คาบหรือระยะนาบของเกรตติงอยู่ในแนวแกน x_0 ดังภาพที่ 2-2 เมื่อแสงเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงที่ $z = 0$ สามารถเขียนฟังก์ชันคลื่นในส่วนที่ไม่ขึ้นกับเวลาได้ ดังสมการ

$$\varphi_0(x, z = 0) = \sum_n A_n \exp\{ink_d x_0 - \frac{x_0^2}{\gamma^2}\} \quad (2.4)$$

เมื่อ $k_d = 2\pi / d$ เป็นองค์ประกอบของเลขคลื่นในแนวระยะนาบของเกรตติง โดยที่ d คือ คาบของเกรตติง และ $A_n = \sin(n\pi f) / n\pi$ เป็นองค์ประกอบฟูรีเยร์สำหรับเกรตติงที่มีค่าอัตราส่วนช่องเปิด f (Case, Tomandl, Deachapunya, & Arndt, 2009)



ภาพที่ 2-2 แผนผังการเลี้ยวเบนของแสง

เมื่อคลื่นแผ่ไปที่ระยะ z ใด ๆ ระหว่างเกรตติงและฉากรับภาพ สามารถหาฟังก์ชันคลื่นได้ด้วยการใช้ปริพันธ์ของฮอยเกนส์-เฟรสเนล (Huygens-Fresnel integral) (Guenther, 1990)

จากสมการ

$$\varphi(x, z) = \sqrt{\frac{i}{\lambda}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varphi_0}{R} e^{-ikR} dx_0 \quad (2-5)$$

จากภาพที่ 2-2 เมื่อ $R = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + z^2}$ เป็นระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นตามหลักการของฮอยเกนส์บนเกรตติงถึงจุดสังเกตบนฉากรับภาพ เมื่อใช้การกระจายแบบไบนอมิยัล (Binomial expansion) ถ้า $z \gg x_1 - x_0$ จะได้

$$R = z + \frac{(x_1 - x_0)^2}{2z} \quad (2-6)$$

แทนค่าสมการที่ 2-4 และ 2-6 ลงในสมการ 2-5 จะได้

$$\varphi(x, z) = \sqrt{\frac{i}{\lambda}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sum_n A_n \exp\{ink_d x_0 - \frac{x_0^2}{\gamma^2}\}}{z + \frac{(x_1 - x_0)^2}{2z}} e^{-ik\left(z + \frac{(x_1 - x_0)^2}{2z}\right)} dx_0 \quad (2-7)$$

จากการประมาณค่าของเฟรสเนล (Fresnel approximation) (Guenther, 1990) เมื่อช่วงของ Z ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับช่วงของ x_1-x_0 ดังนั้นสมการที่ 2-7 จึงเขียนได้เป็น

$$\varphi(x, z) = \sqrt{\frac{i}{\lambda}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sum_n A_n \exp\{ink_d x_0\}}{z} e^{-ik\left(z + \frac{(x_1-x_0)^2}{2z}\right)} dx_0 \quad (2-8)$$

จะได้ฟังก์ชันคลื่นอยู่ในรูป

$$\varphi(x, z) = \sum_n A_n \exp\left\{\frac{\left(\frac{kx}{z} - nk_d\right)^2}{4\left(\frac{1}{z^2} + \frac{ik}{2z}\right)}\right\} \quad (2-9)$$

หากพิจารณาแสงเป็นคลื่นระนาบ นั่นคือ รัศมีค่าแสงแบบเกาส์ $\gamma \rightarrow \infty$ จะได้ฟังก์ชันคลื่นในรูป

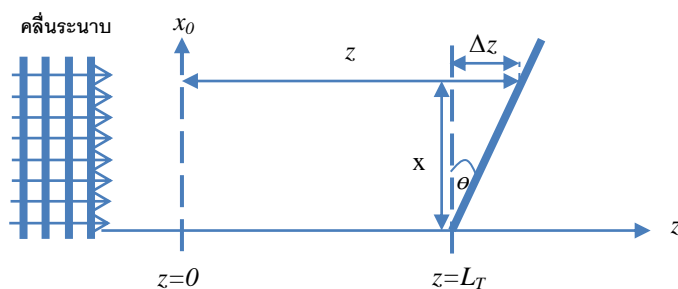
$$\varphi(x, z) = \sum_n A_n \exp\left\{ink_d x + in^2 \pi \left(\frac{z}{L_T}\right)\right\} \quad (2-11)$$

เมื่อ $L_T = d^2 / \lambda$ ก็คือ ระยะทาล์บอต และความเข้มแสงของร็วรอยการแทรกสอดสามารถหาได้ดังสมการ

$$I = \varphi^*(x, z)\varphi(x, z) \quad (2-12)$$

$$I = \sum_{n,m} A_n A_m \exp\left\{i(n-m)k_d x + i(n^2 - m^2)\pi \left(\frac{z}{L_T}\right)\right\} \quad (2-13)$$

เพื่อประยุกต์ใช้การเปลี่ยนแปลงรีวรอยการแทรกสอดคังสมการ 2-13 เข้ากับการวัดมุมเอียง สามารถทำได้โดยเอียงฉากรับทำมุม θ ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 แผนผังแบบจำลองเมื่อพื้นผิวระนาบทำมุมเอียง θ โดยให้ฉากรับที่ถูกหมุนไปมีจุดหมุนอยู่ที่ระยะหนึ่งทาร์บอด

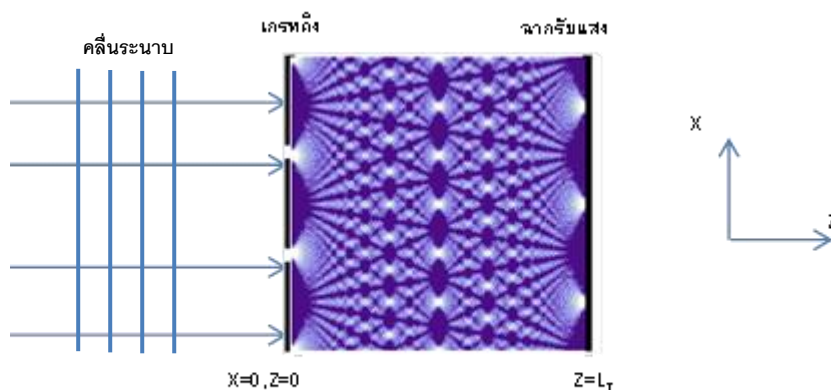
จากการเอียงฉากรับภาพ จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งบนฉาก x กับระยะ z เป็น

$$z = L_T + x \tan \theta \quad (2-14)$$

การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรีวรอยการแทรกสอดอันเนื่องมาจากมุมเอียงจึงสามารถทำได้โดย แทนค่าสมการที่ 2-14 ลงในสมการรีวรอยความเข้มแสงตามสมการที่ 2-13 และสามารถศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสงได้

2.2 พรหมของแสงในปรากฏการณ์ทาล์บอด

รีวรอยการแทรกสอดที่แสดงไว้ในภาพที่ 2-4 ได้จากการจำลองในโปรแกรม mathematica ด้วยสมการที่ (2-13) โดยรีวรอยที่เกิดขึ้นในระนาบ xz เรียกว่า พรหมของแสง ซึ่งมีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการแทรกสอดแบบสนามไกล โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโดยตลอด และจะมีรีวรอยเท่ากับขนาดของเกรตติงเมื่อระยะห่างระหว่างเกรตติงและตำแหน่งฉากรับเป็นจำนวนเต็มเท่าของระยะทาล์บอด



ภาพที่ 2-4 แบบจำลองวีรรอยการแทรกสอดของแสงที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์ทาล์บอต โดยในที่นี้ ใช้แสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตรเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงคาบ d ขนาด 200 ไมโครเมตร โดยมีอัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.1$ และใช้ผลรวม n, m จาก -25 ถึง 25 โดยใช้สมการที่ 2-13

2.3 การกระจายความเข้มแสงของการแทรกสอด

1. การกระจายความเข้มแสงจากการแทรกสอดแบบสนามไกล

การกระจายความเข้มแสงของการแทรกสอดแบบสนามไกลนั้น สามารถแสดงได้ดังสมการ (การแทรกสอดของคลื่นแสง, 2556)

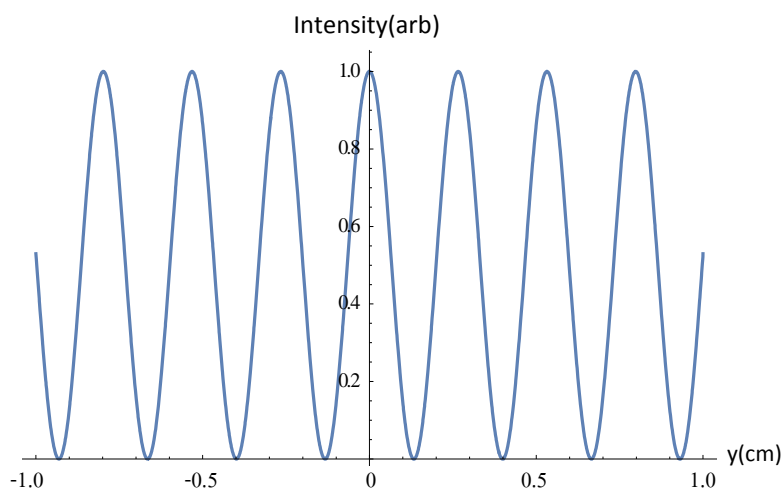
$$I = I_{\max} \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right) \quad (2-15)$$

เมื่อ I_{\max} คือ ความเข้มแสงของแถบสว่างกลาง λ คือ ความยาวคลื่น และ $d \sin \theta$ คือ ความแตกต่างของระยะทางเดินของแสง หรือสามารถเขียนสมการที่ 2-14 ได้เป็น

$$I = I_{\max} \cos^2 \left(\frac{d \pi y}{\lambda L} \right) \quad (2-16)$$

เมื่อ d คือ ค่าคงที่ของเกรตติง λ คือ ความยาวคลื่น y คือ ตำแหน่งใดๆ บนฉากรับแสง และ L คือ ระยะห่างระหว่างเกรตติงและฉากรับแสง

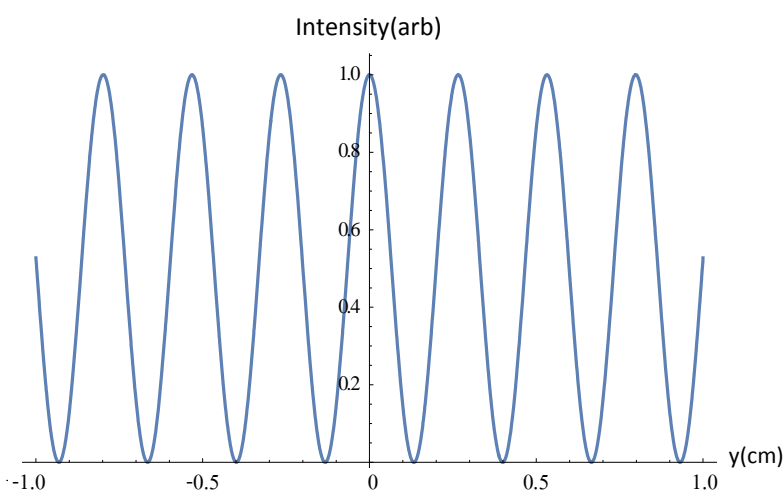
เมื่อจำลองสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Mathematica ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับแสงกับความเข้มแสง ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับความเข้มแสง

เมื่อ $L = 1 \text{ m}$, $d = 200 \times 10^{-6} \text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9} \text{ m}$ โดยใช้สมการที่ 2-16

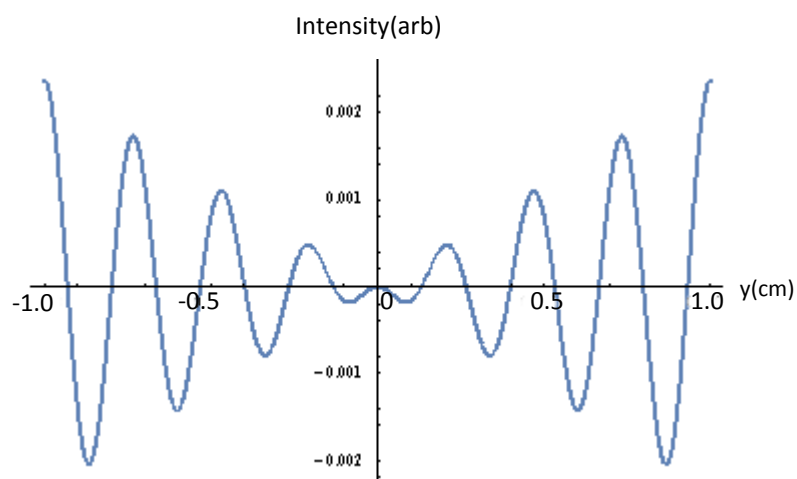
จากนั้นเลื่อนฉากออกไปที่ระยะ $L = 1 + d \text{ m}$ จะได้กราฟดังภาพที่ 2-6 พบว่ารูปร่างของกราฟไม่แตกต่างจากกราฟในภาพที่ 2-5 นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงไม่มากนักสังเกตได้



ภาพที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับความเข้มแสง

เมื่อ $L = 1 + d \text{ m}$, $d = 200 \times 10^{-6} \text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9} \text{ m}$ โดยใช้สมการ 2-16

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความเข้มแสงของทั้งสองกรณี ได้กราฟ ดังภาพที่ 2-7 จะเห็นได้ว่าการเลื่อนระยะฉากรับภาพในการแทรกสอดแบบสนามไกล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงน้อยมาก



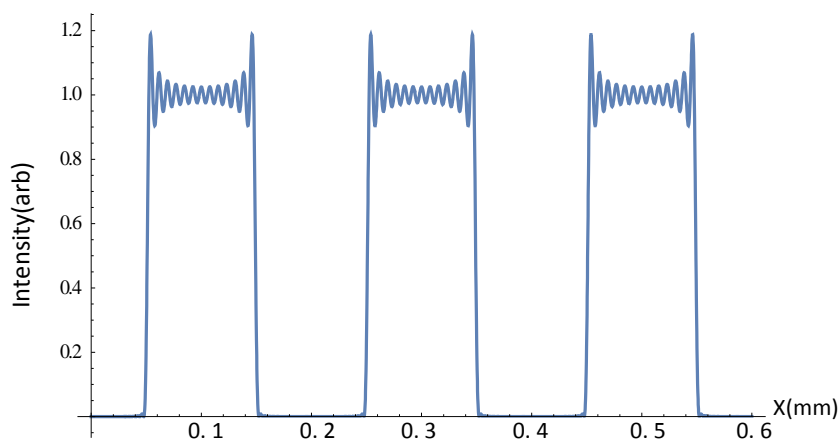
ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับผลต่างของความเข้มแสง

เมื่อ $L = 1 \text{ m}$ กับ $L = 1 + d \text{ m}$, $d = 200 \times 10^{-6} \text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9} \text{ m}$ โดยใช้ สมการที่ 2-16

ถ้านำการแทรกสอดแบบสนามไกลไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับความเอียงของระนาบพื้นผิวถือว่ามีความจำเป็นน้อยมาก เนื่องจากจะสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่ชัดเจนได้เมื่อระยะของฉากแตกต่างกันในระดับเซนติเมตร ซึ่งงานในลักษณะนี้ต้องการวิธีการตรวจสอบและเครื่องมือที่มีความจำเป็นสูง

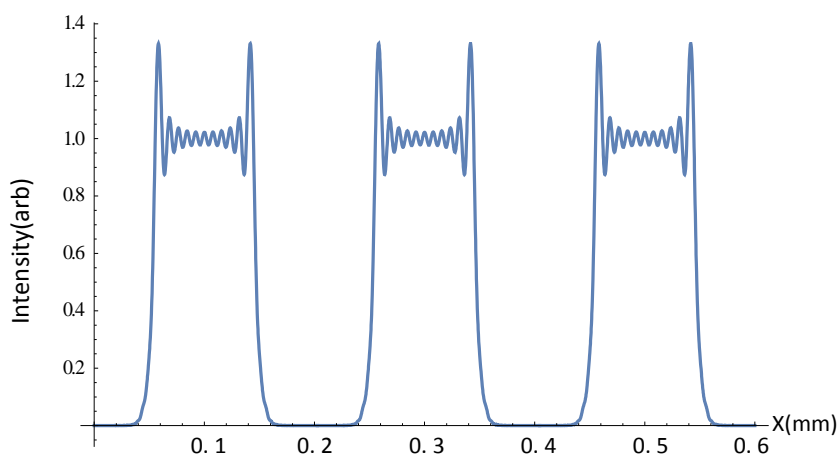
2. การกระจายความเข้มแสงจากการแทรกสอดแบบสนามไกล

จากการศึกษาการแทรกสอดแบบระยะไกลในปรากฏการณ์ทาล์บอต ด้วยการสร้างแบบจำลองสถานการณ์จริงโดยใช้โปรแกรม Mathematica ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับแสงกับความเข้มแสง ดังภาพที่ 2-8



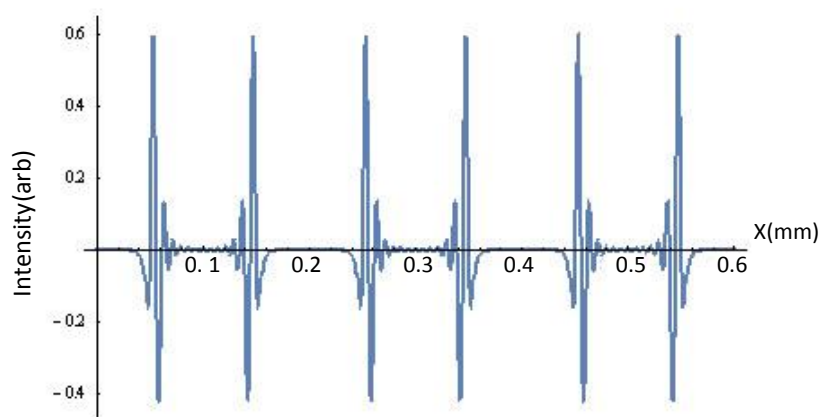
ภาพที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับความเข้มแสงที่เกิดจาก $f = 0.5$ ที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_T$ เมื่อ $d = 200 \times 10^{-6} \text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9} \text{ m}$ โดยใช้สมการที่ 2-13

เมื่อมีการเลื่อนฉากรับภาพออกไป พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง ซึ่งสังเกตได้จากรูปร่างของกราฟที่เปลี่ยนไป ดังภาพที่ 2-9



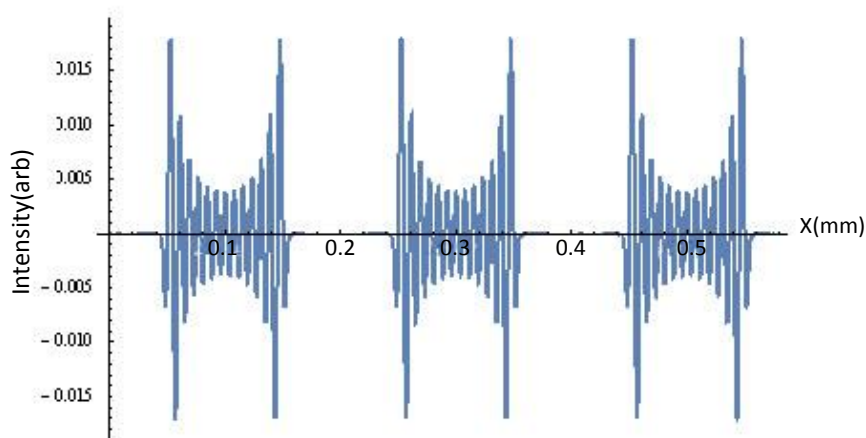
ภาพที่ 2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับความเข้มแสงที่เกิดจาก $f = 0.5$ ที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_T + d$, $d = 200 \times 10^{-6} \text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9} \text{ m}$ โดยใช้สมการที่ 2-13

จากภาพที่ 2-8 และ 2-9 การเลื่อนฉากรับภาพจากระยะ L_T เป็น L_T+d พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่ชัดเจน ผลต่างของความเข้มแสงที่เกิดขึ้นแสดงได้ ดังภาพที่ 2-10

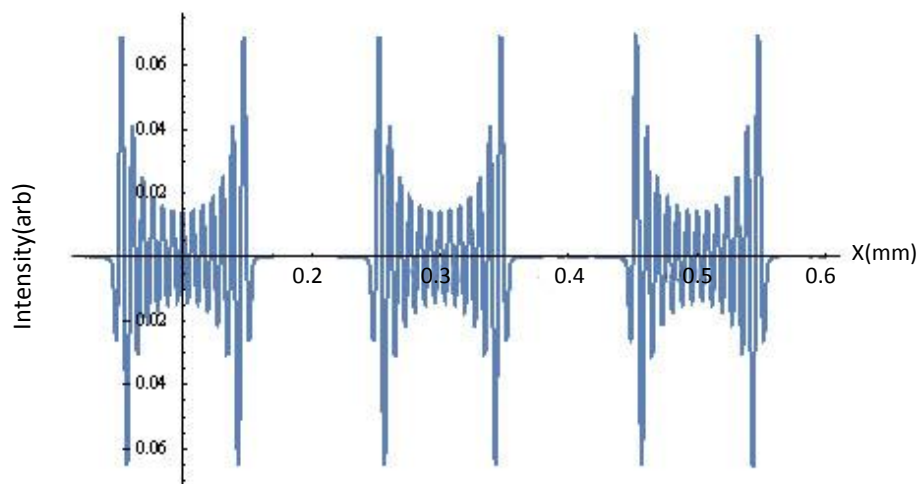


ภาพที่ 2-10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับผลต่างของความเข้มแสงที่เกิดจาก $f=0.5$ ที่ระยะตั้งแต่ $z=0$ ถึง $z=L_T$ กับที่ระยะตั้งแต่ $z=0$ ถึง $z=L_T+d$ เมื่อ, $d=200 \times 10^{-6} m$ และ $\lambda=532 \times 10^{-9} m$ โดยใช้สมการที่ 2-13

เมื่อจำลองเลื่อนระยะฉากรับภาพที่ระยะต่าง ๆ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่ชัดเจนมากแม้เลื่อนฉากไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2-11 และ 2-12



ภาพที่ 2-11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับผลต่างของความเข้มแสงที่เกิดจาก $f=0.5$ ที่ระยะตั้งแต่ $z=0$ ถึง $z=L_T$ กับที่ระยะตั้งแต่ $z=0$ ถึง $z=L_T-0.1d$ เมื่อ, $d=200 \times 10^{-6} m$ และ $\lambda=532 \times 10^{-9} m$ โดยใช้สมการที่ 2-13



ภาพที่ 2-12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของฉากรับภาพกับผลต่างของความเข้มแสง
 ที่เกิดจาก $f = 0.5$ ที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง $z = L_T$ กับที่ระยะตั้งแต่ $z = 0$ ถึง
 $z = L_T - 0.2d$ เมื่อ, $d = 200 \times 10^{-6} \text{ m}$ และ $\lambda = 532 \times 10^{-9} \text{ m}$
 โดยใช้สมการที่ 2-13

จากกราฟที่แสดงในภาพที่ 2-10, 2-11 และ 2-12 จะเห็นได้ว่าในกรณีของการแทรกสอดแบบสนามใกล้ ความเข้มแสงจากรีวรอยการแทรกสอดจะมีการเปลี่ยนแปลงไป แม้ว่าระยะจากเกรตติงถึงฉากรับแสงจะเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งแตกต่างจากกรณีของสนามไกล งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการประยุกต์ใช้การแทรกสอดแบบสนามใกล้สำหรับการวิเคราะห์ความเอียงของพื้นผิวของพื้นผิว โดยจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงรวมไปถึงรูปแบบของรีวรอยการแทรกสอด เมื่อพื้นผิวที่แสงตกกระทบมีความเอียง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Thakur, Quan, and Tay (2005) ศึกษาเกี่ยวกับการตรวจสอบพื้นผิวโดยใช้รีวรอยการแทรกสอดของปรากฏการณ์เลา โดยสร้างรูปแบบรีวรอยการแทรกสอดจากหน้าคลื่นระนาบ และให้รีวรอยการแทรกสอดฉายลงไปยังบนพื้นผิวที่ตรวจสอบ และเก็บข้อมูลโดยใช้กล้อง CCD ซึ่งในงานวิจัยนี้จำลองตรวจสอบตัวอย่างพื้นผิวสองตัวอย่างคือ ผิวโค้งนูน ความสูง 4 มิลลิเมตรและเหรียญ โดยเปรียบเทียบการวัดที่ได้จากปรากฏการณ์เลากับการวัดของเครื่องวัดเชิงกล ส่วนการตรวจสอบผิวโค้งนูนนั้นเปรียบเทียบผลการวัดกับรีวการแทรกสอดแบบปรากฏการณ์ทาล์บอด

Sanchez-Brea, Torcal-Milla, and Bernabeu (2007) ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทาล์บอดเมื่อแสงมีลักษณะลำแสงแบบเกาส์เดินทางผ่านเกรตติงโลหะ ซึ่งเกรตติงโลหะสามารถพบได้ในการระบบการวัดด้วยแสง ซึ่งในกระบวนการผลิตเกรตติงทำให้พื้นผิวของเกรตติงค่อนข้างขรุขระ ในงานวิจัยนี้ใช้ลำแสงแบบเกาส์เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงโลหะเพื่อวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว โดยแบบจำลองอยู่บนพื้นฐานของการเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนลและการกระจายความเข้มแสงของการแทรกสอดแบบสนามไกล โดยพิจารณาจากความแตกต่างของรัวรอยการแทรกสอดที่ระยะทาล์บอดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างเกรตติงและฉากรับแสง เมื่อฟังก์ชันออโตคอริเลชันของความขรุขระมีลักษณะแบบเกาส์เซียน ลำแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงก็ยังคงเป็นแบบเกาส์เซียนแต่มีคุณสมบัติบางอย่างเปลี่ยนไป เช่น ความกว้างของลำแสงเลี้ยวเบนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเกรตติงแบบแก้วแต่กำลังของลำแสงเลี้ยวเบนแต่ละอันไม่ขึ้นกับความขรุขระของพื้นผิว

Dechapunya and Srisuphaphon (2014) ศึกษาการตอบสนองจากการเลื่อนแบบตามขวางของเกรตติงคู่ในปรากฏการณ์ทาล์บอด ด้วยการเพิ่มเกรตติงอีกอันหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวก้ำบังและนำไปวางไว้ข้างหลังเกรตติงที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน หลังจากนั้นเลื่อนเกรตติงนี้ตามขวางเพื่อทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของเกรตติงและสัดส่วนของช่องเปิดของเกรตติง จากผลการจำลองพบว่า เมื่อค่าคงที่ของเกรตติงลดลง ลวดลายพรหมของแสงจะมีการตอบสนองมากขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของช่องเปิดของเกรตติงไม่มีผลทำให้ลวดลายพรหมของแสงเปลี่ยนไป ซึ่งจากการจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์แทนเซนเซอร์ที่มีความไวสูงได้ เช่น การตรวจวัดระยะทาง สเปกโตรมิเตอร์ และการตรวจจับการสั่น

Agarwal and Shakher (2015) ศึกษาการวัดการกระจัดของระนาบโดยการใส่เกรตติงแบบวงกลมในทาล์บอดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ด้วยการจำลองการกระจายความเข้มแสงแบบเชิงเส้นระหว่างเกรตติง 2 อันขึ้นมาและดูการเปลี่ยนตำแหน่งของรัวรอยการแทรกสอดลำดับศูนย์ หนึ่งสอง และสามจากจุดศูนย์กลางของเกรตติงเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงการกระจัดของระนาบ ซึ่งวิธีนี้สามารถวัดการกระจัดของระนาบในช่วงไมโครเมตรถึงมิลลิเมตร

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของระยะระหว่างฉากรับแสงและเกรตติงที่มีต่อความเข้มแสงและผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสงในการแทรกสอดแบบสนามใกล้ โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย

1. คอมพิวเตอร์
2. โปรแกรม Mathematica Version 8.0

3.2 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยได้ออกแบบการจำลองเป็น 2 ตอนและมีรายละเอียดดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาผลของระยะระหว่างฉากรับแสงและเกรตติงที่มีต่อความเข้มแสง

1. จำลองความเข้มแสงจากทฤษฎีการแทรกสอดแบบสนามใกล้ โดยใช้สมการที่ 2-13 โดยกำหนดค่าตัวแปรดังนี้ ความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $d = 50 \mu\text{m}$ และอัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$

2. พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x กับความเข้มแสง ที่ระยะ z ดังนี้
 $z = L_T$ $z = L_T + 5 \mu\text{m}$ $z = L_T - 5 \mu\text{m}$ $z = L_T + 10 \mu\text{m}$ และ $z = L_T - 10 \mu\text{m}$

3. เปรียบเทียบลักษณะของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสงที่ระยะ z ต่างๆ กับ $z = L_T$

ตอนที่ 2 การศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่างๆ ที่มีต่อความเข้มแสง

1. จำลองความเข้มแสงของพื้นผิวระนาบเอียงทำมุม θ กับแกน x ดังรูปที่ 2-3 โดยแทนสมการที่ 2-14 ลงในสมการที่ 2-13 กำหนดค่าให้แสงความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $d = 200 \mu\text{m}$ อัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$ และระยะระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสง $z = L_T$ ที่มุมเอียงต่าง ๆ ดังนี้ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 องศา

2. พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสงที่มุมเอียงต่าง ๆ โดยเปลี่ยนค่ามุม (θ) ของระนาบกับแกน x และเปรียบเทียบความแตกต่างของกราฟ
3. จำลองความเข้มแสงโดยแทนสมการที่ 2.9 ลงในสมการที่ 2-12 กำหนดให้แสงความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $d = 200 \mu\text{m}$ อัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$ ระยะระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสง $z = L_T$ และรัศมีลำแสงแบบเกาส์ y มีค่าเป็น 1, 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร
4. พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสงที่รัศมีลำแสงแบบเกาส์ต่าง ๆ พร้อมทั้งคำนวณและเปรียบเทียบความกว้างของกราฟ
5. จำลองความเข้มแสงของพื้นผิวระนาบเอียงทำมุม θ กับแกน x โดยกำหนดให้พื้นผิวระนาบมีความยาวหรือกว้างประมาณ 2 cm เปลี่ยนค่าตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ คาบของเกรตติง อัตราส่วนช่องเปิด และความยาวคลื่นของแสง โดยใช้เกรตติงที่มีคาบเกรตติง d เท่ากับ 50, 100, 150 และ 200 ไมโครเมตร และอัตราส่วนช่องเปิด f เป็น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 กับแสงที่มีความยาวคลื่น λ เท่ากับ 445, 532 และ 635 นาโนเมตร
6. พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสงที่มุมเอียงต่าง ๆ โดยเปลี่ยนค่ามุม (θ) ของระนาบกับแกน x ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 องศา โดยเพิ่มครั้งละ 0.1 องศา เนื่องจากสามารถวัดค่าความกว้างของแถบสว่างได้จริงในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างเช่น กล้อง CCD (DCU223C, Thorlabs) ซึ่งมีอำนาจจำแนกหรือขนาดของพิกเซลอยู่ที่ประมาณ 4 ไมโครเมตร
7. คำนวณหาความกว้างของกราฟที่ได้ในข้อที่ 6 ตรงตำแหน่งของค่าความเข้มแสงเฉลี่ย และเปรียบเทียบความแตกต่างความกว้างกับกราฟที่มุมเอียงต่าง ๆ กับมุม 0 องศา โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์
8. วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของกราฟที่ได้
9. สรุปผลและอภิปรายผล

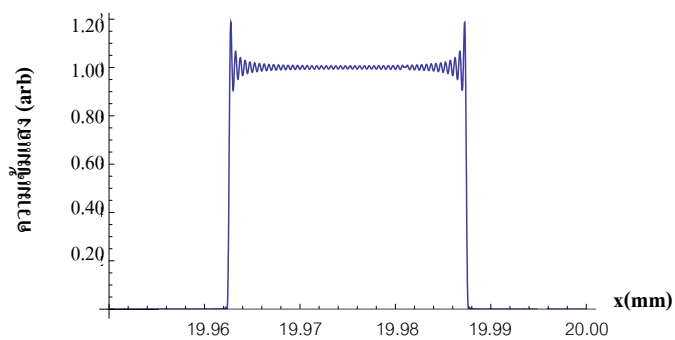
บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

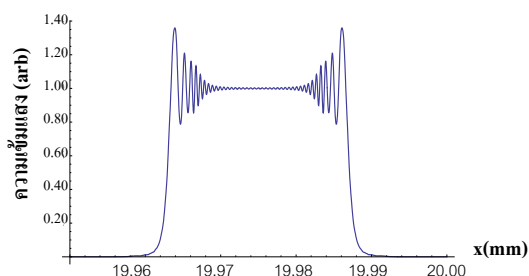
ในการวิจัยเรื่องอำนาจการแยกแยะของการแทรกสอดสนามใกล้สำหรับการตรวจวัดความเอียงของระนาบ ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางการวิจัยโดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 การศึกษาผลของระยะระหว่างฉากรับแสงและเกรตติงที่มีต่อความเข้มแสง และตอนที่ 2 การศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาผลของระยะระหว่างฉากรับแสงและเกรตติงที่มีต่อความเข้มแสง

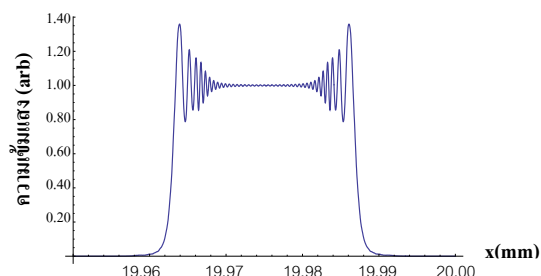
จากการศึกษาในตอนที่ 1 ศึกษาผลของระยะระหว่างฉากรับแสงและเกรตติงที่มีต่อความเข้มแสงของการแทรกสอดแบบสนามใกล้ โดยกำหนดค่าตัวแปรดังนี้ ความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $d = 50 \text{ }\mu\text{m}$ และอัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$ ระยะระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสง z ดังนี้ $z = L_T$, $z = L_T + 5\text{ }\mu\text{m}$, $z = L_T - 5\text{ }\mu\text{m}$, $z = L_T + 10\text{ }\mu\text{m}$ และ $z = L_T - 10\text{ }\mu\text{m}$ และจำลองความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสง จากสมการที่ 2-13 ได้ผลการจำลองดังนี้



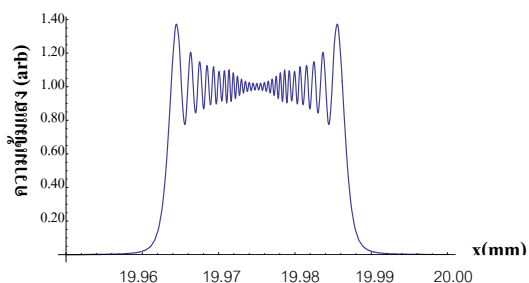
(ก)



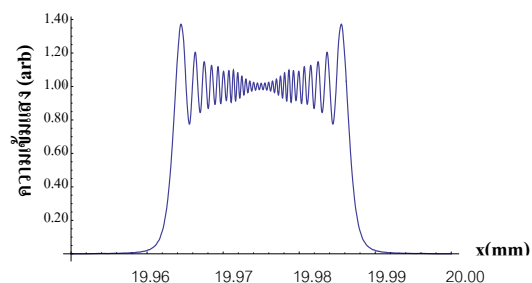
(ข)



(ค)



(ง)



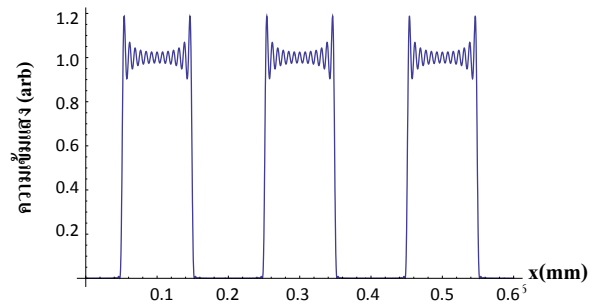
(จ)

ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสง โดยใช้คลื่น
 มีความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $d = 50 \mu\text{m}$ และอัตราส่วนช่องเปิด
 $f = 0.5$ เมื่อ (ก) $z = L_T$ (ข) $z = L_T + 5 \mu\text{m}$ (ค) $z = L_T - 5 \mu\text{m}$ (ง) $z = L_T + 10 \mu\text{m}$
 และ (จ) $z = L_T - 10 \mu\text{m}$ จากสมการที่ 2-13

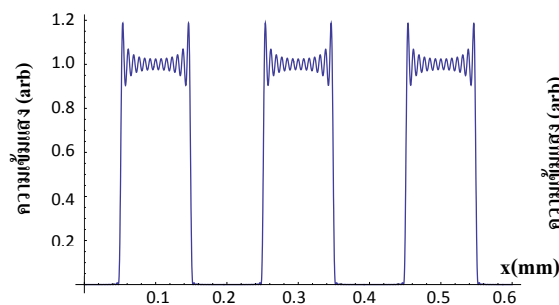
จากภาพที่ 4-1 เมื่อมีการเลื่อนฉากรับแสงเข้าใกล้และห่างออกไปจากเกรตติงเป็นระยะ $z = L_T$, $z = L_T + 5\mu\text{m}$, $z = L_T - 5\mu\text{m}$, $z = L_T + 10\mu\text{m}$ และ $z = L_T - 10\mu\text{m}$ จากผลการจำลองพบว่า กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสง มีรูปร่างกราฟ และความกว้างของกราฟมีการเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนไปอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับระยะ $z = L_T$ ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้ความแตกต่างความกว้างของกราฟสำหรับศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียง ต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสงในตอนที่ 2

ตอนที่ 2 การศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่างๆ ที่มีต่อความเข้มแสง

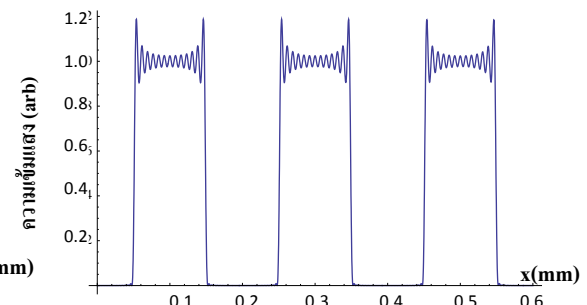
จากการศึกษาในตอนที่ 2 ศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสง แบ่งเป็นสามขั้นตอน โดยขั้นที่หนึ่ง จำลองแสงความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงที่มีคาบของเกรตติง $d = 200 \mu\text{m}$ อัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$ และระยะระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสง $z = L_T$ แล้วจำลองเปลี่ยนมุมเอียงต่าง ๆ ดังนี้ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 องศาและเปรียบเทียบความเข้มแสงที่มุมเอียงต่างๆ กับความเข้มแสงที่มุม 0 องศา โดยจำลองความเข้มแสงด้วยสมการที่ 2-13 และปรับมุมเอียงโดยใช้สมการที่ 2-14 ได้ผลการจำลองดังนี้



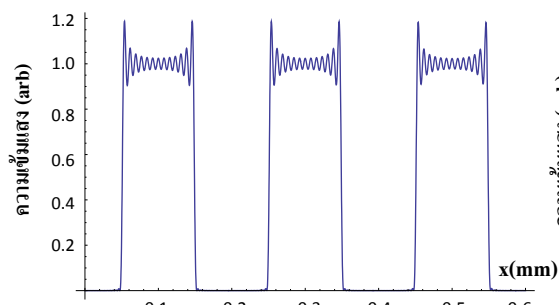
(ก)



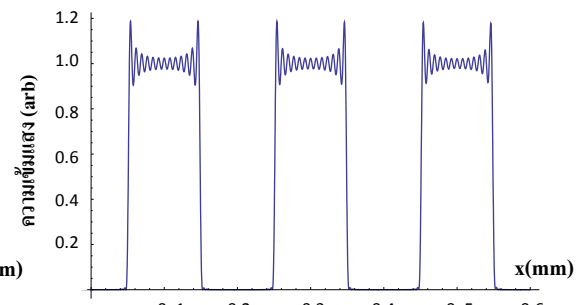
(ข)



(ค)



(ง)



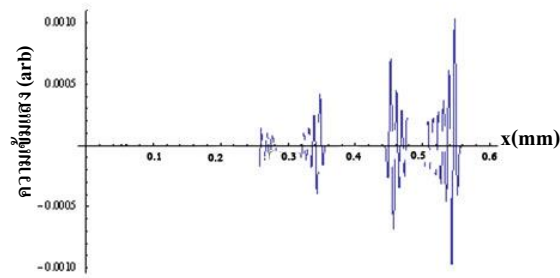
(จ)

ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสง โดยใช้แสง

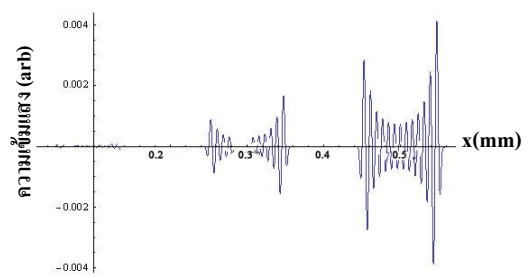
ความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $d = 200 \mu\text{m}$ อัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$

และระยะระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสง $z = L_T$ ที่มุมเอียงต่าง ๆ ดังนี้ (ก) 0 องศา

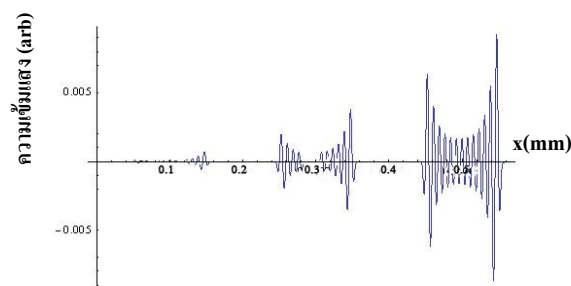
(ข) 0.5 องศา (ค) 1 องศา (ง) 1.5 องศา และ (จ) 2 องศา โดยใช้สมการที่ 2-13 และ 2-14



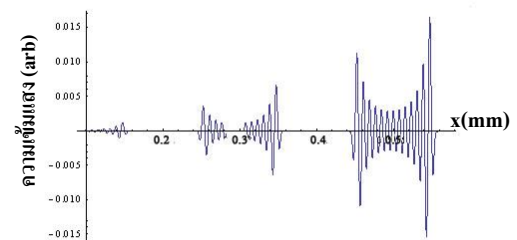
(ก)



(ข)



(ค)



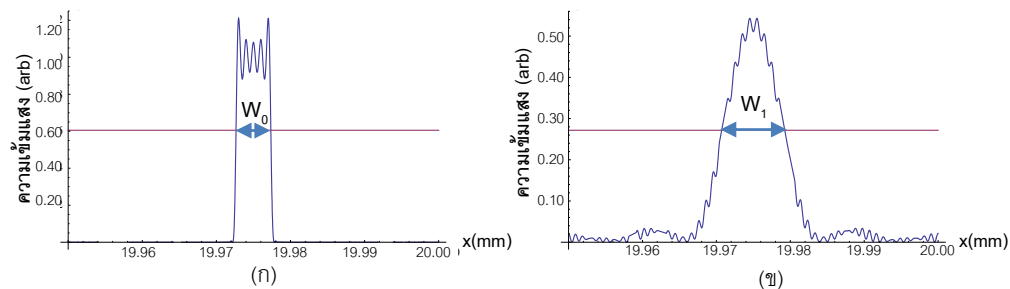
(ง)

ภาพที่ 4-3 เปรียบเทียบความแตกต่างของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสง โดยใช้แสงความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $d = 200 \mu\text{m}$ อัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$ และระยะระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสง $z = L_T$ ระหว่างมุมเอียง 0 องศา กับมุมเอียงต่าง ๆ ดังนี้ (ก) 0.5 องศา (ข) 1 องศา (ค) 1.5 องศา และ (ง) 2 องศา โดยใช้สมการที่ 2-13 และ 2-14

จากผลการจำลองดังภาพที่ 4-3 และ 4-4 เมื่อพื้นผิวระนาบทำมุมเอียงต่าง ๆ พบว่า ค่าความเข้มแสงและรูปร่างของกราฟเปลี่ยนไป โดยเฉพาะกราฟแท่งสุดท้าย (ขวาสุด) มีความเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ซึ่งตำแหน่งที่มีระยะห่างผิดไปจากตำแหน่ง $z = L_T$ มากที่สุด ดังนั้นผู้วิจัย จึงใช้การเปลี่ยนแปลงความกว้างของกราฟในกราฟแท่งสุดท้าย สำหรับการศึกษาในขั้นต่อไป

ขั้นที่สอง ศึกษาการบานออกของลำแสงโดยมีรูปแบบลำแสงแบบเกาส์ มีผลต่อความกว้างของกราฟหรือไม่ ด้วยการจำลองความเข้มแสงจากสมการที่ 2-12 และฟังก์ชันคลื่นในสมการที่ 2-9 โดยการกำหนดแสงความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงที่มีคาบ

ของเกรตติง $d = 200 \mu\text{m}$ อัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$ ระยะระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสง $z = L_T$ และรัศมีลำแสงแบบเกาส์ γ มีค่าเป็น 1 2 3 4 และ 5 เซนติเมตร และเปรียบเทียบความแตกต่างความกว้างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสงที่ได้ โดยใช้โปรแกรม Mathematica คำนวณหาความกว้างของกราฟ W ที่ตำแหน่งความเข้มแสงเฉลี่ย ซึ่งความเข้มเฉลี่ยมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความเข้มสูงสุด ดังภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x และความเข้มแสง โดยใช้แสงความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร เลี้ยวเบนผ่านเกรตติงคาบ d ขนาด 50 ไมโครเมตร โดยมีอัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.1$ เมื่อ (ก) มุม 0 องศา และ (ข) มุม 0.2 องศา โดยใช้สมการที่ 2-13 และ 2-14

จากผลการศึกษาในขั้นที่สองได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4-1 เปรียบเทียบความกว้างของกราฟ เมื่อแสงมีความยาวคลื่น $\lambda = 532 \text{ nm}$ คาบของเกรตติง $d = 200 \mu\text{m}$ อัตราส่วนช่องเปิด $f = 0.5$ ระยะระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสง $z = L_T$ ที่รัศมีลำแสงแบบเกาส์ γ มีค่าต่างๆ

γ (cm)	W (μm)
1	98.35
2	99.08
3	98.90
4	98.88
5	98.87

จากตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่า เมื่อรัศมีลำแสงแบบเกาส์ γ เพิ่มขึ้น พบว่า ความกว้างของกราฟความเข้มแสงเปลี่ยนไปน้อยมาก ซึ่งแตกต่างไม่ถึง 1 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับรัศมีลำแสงแบบเกาส์ที่เพิ่มมากขึ้นในระดับเซนติเมตร ทำให้สามารถละทิ้งการพิจารณาการบานของลำแสงในการศึกษาขั้นต่อไปได้ ดังนั้นการศึกษาในขั้นที่สาม ผู้วิจัยจึงจำลองความเข้มแสงโดยใช้สมการที่ 2-13 ซึ่งแสงเป็นคลื่นระนาบที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง

ขั้นที่สาม ศึกษาผลของพื่นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสง โดยเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ อัตราส่วนช่องเปิด ค่าคงที่ของเกรตติง และความยาวคลื่นแสง โดยใช้เกรตติงที่มีคาบเกรตติง d เท่ากับ 50, 100, 150 และ 200 ไมโครเมตร และอัตราส่วนช่องเปิด f เป็น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 กับแสงที่มีความยาวคลื่น 445, 532 และ 635 นาโนเมตร และสมมติให้พื่นผิวระนาบมีความยาวหรือกว้างประมาณ 2 เซนติเมตร จำลองเปลี่ยนค่ามุม (θ) ของระนาบกับแกน x และจำลองความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x กับความเข้มแสงที่มุมเอียงต่าง ๆ จากนั้นคำนวณหาความกว้างของกราฟและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟโดยเปรียบเทียบกับความกว้างของกราฟเมื่อ $z = L_T$ ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของกราฟหาได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟ (\%)} = \frac{|w_1 - w_0|}{w_0} \times 100\% \quad (4-1)$$

จากการศึกษาในขั้นที่สามได้ผล ดังนี้

เมื่อกำหนดให้มุมเอียงเท่ากับ 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 445 นาโนเมตร ค่าคงที่ของเกรตติงมีค่า 50, 100, 150 และ 200 ไมโครเมตร และค่าอัตราส่วนช่องเปิด 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 ได้ผลการจำลองดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 เปรียบเทียบความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงที่ค่าคงที่ของเกรตติง d และค่าอัตราส่วนช่องเปิด f ต่าง ๆ กำหนดมุมเอียง 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 445 นาโนเมตร

d (μm)	ความแตกต่างความกว้างของกราฟ (%)				
	$f = 0.1$	$f = 0.3$	$f = 0.5$	$f = 0.7$	$f = 0.9$
50	39.4	21.7	10.8	7.6	7.3
100	26.9	7.9	4.7	3.4	2.6
150	13.5	4.5	2.7	2.0	1.6
200	6.7	2.1	1.3	0.9	0.7

จากตารางที่ 4-2 ความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงที่ค่าคงที่ของเกรตติง d และค่าอัตราส่วนช่องเปิด f ต่าง ๆ กำหนดมุมเอียง 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 445 นาโนเมตร พบว่า ที่อัตราส่วนช่องเปิด f 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟมากที่สุดเมื่อค่าคงที่ของเกรตติง d เท่ากับ 50 ไมโครเมตร โดยมี เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟเป็น 39.4%, 21.7%, 10.8%, 7.6% และ 7.3% ตามลำดับ

เมื่อกำหนดให้มุมเอียงเท่ากับ 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ค่าคงที่ของเกรตติงมีค่า 50, 100, 150 และ 200 ไมโครเมตร และค่าอัตราส่วนช่องเปิด 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 ได้ผลการจำลองดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 เปรียบเทียบความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงที่ค่าคงที่ของเกรตติง d และค่าอัตราส่วนช่องเปิด f ต่าง ๆ กำหนดมุมเอียง 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร

d (μm)	ความแตกต่างความกว้างของกราฟ (%)				
	$f = 0.1$	$f = 0.3$	$f = 0.5$	$f = 0.7$	$f = 0.9$
50	28.3	23.5	12.0	8.8	9.3
100	36.2	9.2	5.4	3.9	3.1
150	15.7	5.3	3.2	2.3	1.9
200	10.0	3.1	1.8	1.3	1.0

จากตารางที่ 4-3 ความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงที่ค่าคงที่ของเกรตติง d และค่าอัตราส่วนช่องเปิด f ต่าง ๆ กำหนดมุมเอียง 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร พบว่า ที่อัตราส่วนช่องเปิด f เป็น 0.1 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟมากที่สุด เมื่อค่าคงที่ของเกรตติง d เท่ากับ 100 ไมโครเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟเป็น 36.2% และที่อัตราส่วนช่องเปิด f 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟมากที่สุดเมื่อค่าคงที่ของเกรตติง d เท่ากับ 50 ไมโครเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟเป็น 23.5%, 12.0%, 8.8% และ 9.3% ตามลำดับ

เมื่อกำหนดให้มุมเอียงเท่ากับ 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ค่าคงที่ของเกรตติงมีค่า 50, 100, 150 และ 200 ไมโครเมตร และค่าอัตราส่วนช่องเปิด 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 ได้ผลการจำลองดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 เปรียบเทียบความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงที่ค่าคงที่ของเกรทติง d และค่าอัตราส่วนช่องเปิด f ต่าง ๆ กำหนดมุมเอียง 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร

d (μm)	ความแตกต่างความกว้างของกราฟ (%)				
	$f = 0.1$	$f = 0.3$	$f = 0.5$	$f = 0.7$	$f = 0.9$
50	15.2	26.6	13.1	10.6	10.0
100	29.6	9.8	5.8	4.2	3.3
150	21.4	6.6	4.0	2.8	2.3
200	12.3	3.9	2.3	1.6	1.3

จากตารางที่ 4-4 ความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงที่ค่าคงที่ของเกรทติง d และค่าอัตราส่วนช่องเปิด f ต่าง ๆ กำหนดมุมเอียง 0.1 องศา แสงมีความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร พบว่า ที่อัตราส่วนช่องเปิด f เป็น 0.1 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟมากที่สุด เมื่อค่าคงที่ของเกรทติง d เท่ากับ 100 ไมโครเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟเป็น 29.6% และที่อัตราส่วนช่องเปิด 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟมากที่สุดเมื่อค่าคงที่ของเกรทติง d เท่ากับ 50 ไมโครเมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟเป็น 26.6%, 13.1%, 10.6% และ 10.0% ตามลำดับ

จากผลการจำลองตามตารางที่ 4-2, 4-3 และ 4-4 เมื่อค่าคงที่ของเกรตติง d เป็น 50 ไมโครเมตร พบว่า มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงมากที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความกว้างของกราฟที่ค่าคงที่ของเกรตติง d เท่ากับ 50 ไมโครเมตร มาคำนวณหาค่ามุมเอียงของระนาบที่น้อยที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้ โดยกำหนดให้ความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงที่ต้องการตรวจวัด มีค่า 4 ไมโครเมตร ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ค่ามุมที่สามารถตรวจวัดได้ เมื่อความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสง เป็น 4 ไมโครเมตร และคาบของเกรตติง d ขนาด 50 ไมโครเมตร

f	มุม (องศา)		
	$\lambda = 445 \text{ nm}$	$\lambda = 532 \text{ nm}$	$\lambda = 635 \text{ nm}$
0.1	0.28	0.27	0.21
0.3	0.17	0.16	0.12
0.5	0.21	0.15	0.14
0.7	0.20	0.17	0.17
0.9	0.21	0.15	0.11

จากตารางที่ 4-5 พบว่า ที่ความยาวคลื่น λ เท่ากับ 635 nm และอัตราส่วนของช่องเปิด f เท่ากับ 0.9 สามารถตรวจวัดความเอียงของระนาบที่มุม 0.11 องศา กับแกน x ซึ่งมีขนาดของมุมน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จากการจำลองเพื่อหาอำนาจการแยกแยะของการแทรกสอดสนามใกล้เคียงสำหรับการตรวจวัดความเอียงของระนาบ โดยการศึกษาผลของระยะระหว่างฉากรับแสงและเกรตติงที่มีต่อความเข้มแสง โดยพิจารณาจากรูปร่างและความกว้างของกราฟความเข้มแสง รวมไปถึงศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสง ด้วยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความกว้างของกราฟความเข้มแสง สามารถสรุปผลและอภิปรายผลรวมทั้งให้ข้อเสนอแนะได้ดังนี้

5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

ตอนที่ 1 การศึกษาผลของระยะระหว่างฉากรับแสงและเกรตติงที่มีต่อความเข้มแสง

จากการศึกษาในตอนที่ 1 ศึกษาผลของระยะระหว่างฉากรับแสงและเกรตติงที่มีต่อความเข้มแสงของการแทรกสอดแบบสนามใกล้เคียง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างเกรตติงกับฉากรับแสง พบว่า เมื่อระยะของฉากรับภาพเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากเดิม รูปร่างและความกว้างของกราฟความเข้มแสงจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แม้จะเลื่อนระยะฉากไปเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4-1 ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการกระจายความเข้มแสงของการแทรกสอดแบบสนามใกล้เคียงที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยตลอด แตกต่างจากแบบสนามไกลซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ถ้าฉากรับแสงเลื่อนออกไปเพียงเล็กน้อย หรือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของรัวรอยถ้าระยะที่ฉากรับแสงเลื่อนออกไปนั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างแถบสว่าง

ตอนที่ 2 การศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสง

จากการศึกษาในตอนที่ 2 ศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสง ซึ่งแบ่งเป็นสามขั้นตอน ในขั้นที่หนึ่ง ศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสง ด้วยการเปรียบเทียบความเข้มแสงที่มุมเอียงต่าง ๆ กับความเข้มแสงที่มุม 0 องศา พบว่า เมื่อค่ามุมเปลี่ยนไป ความเข้มแสงและความกว้างของกราฟความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาความเข้มแสงของรัวแถบสว่างแ่งสุดท้ายหรือทางขอบพื้นผิวดกกระทบด้านขวาสุด ดังภาพที่ 4-3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีระยะห่างแตกต่างไปจากตำแหน่ง $z = L_T$ มากที่สุด

ในขั้นที่สอง ศึกษาการบานออกของลำแสงโดยมีรูปแบบลำแสงแบบเกาส์ พบว่า ความกว้างของกราฟความเข้มแสงเปลี่ยนไปน้อยมาก ซึ่งแตกต่างกันไม่ถึง 1 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับรัศมีลำแสงแบบเกาส์ที่เพิ่มมากขึ้นในระดับเซนติเมตร ดังนั้นในศึกษาผลของพื้นผิวราบทำมุมเอียงต่าง ๆ ที่มีต่อความเข้มแสง จึงสามารถละทิ้งการพิจารณาการบานของลำแสงได้

ในขั้นที่สาม เมื่อนำผลการศึกษาข้างต้นมาประยุกต์เข้ากับกรณีที่แสงตกกระทบบนพื้นผิวระนาบเอียง และวิเคราะห์อำนาจการแยกแยะสำหรับกรณีต่าง ๆ โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร 3 ตัวแปร ได้แก่ อัตราส่วนช่องเปิด ค่าคงที่ของเกรตติง และความยาวคลื่นแสง โดยกำหนดให้มุมเอียงของระนาบเทียบกับแกน x มีค่า 0.1 องศา ความยาวคลื่น 445, 532 และ 635 นาโนเมตร ค่าคงที่ของเกรตติงเป็น 50, 100, 150 และ 200 ไมโครเมตร อัตราส่วนช่องเปิดเป็น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 พบว่า ที่ค่าคงที่ของเกรตติง 50 ไมโครเมตร มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความกว้างของกราฟความเข้มแสงมากที่สุด

และเมื่ออำนาจการแยกแยะสำหรับการตรวจวัดมุมเอียง พบว่า เมื่อค่าคงที่ของเกรตติงเท่ากับ 50 ไมโครเมตร ความยาวคลื่นแสง 635 นาโนเมตร และ ค่าอัตราส่วนช่องเปิด 0.9 สามารถวัดความเอียงของระนาบได้มุมน้อยที่สุด เท่ากับ 0.11 องศา

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในทางปฏิบัติ หากต้องการความไวในการตรวจวัดความกว้างของแถบสว่างที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ต้องอาศัยกล้อง CCD ที่มีความละเอียดสูง ซึ่งมีราคาแพง เนื่องจากรีจอยการแทรกสอดในปรากฏการณ์ทาล์บอตมีขนาดเล็ก ดังนั้น เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย สามารถปรับปรุงค่าที่วัดได้โดยการขยายรีจอยการแทรกสอดให้ใหญ่ขึ้นได้ด้วยการเพิ่มเลนส์ในชุดการวัด

บรรณานุกรม

- ทศพล สวัสดิ์ และศศิภา เขตรักษา. (2556). การจำลองแฉดทึบของแสงด้วยปรากฏการณ์ทาล์บอด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- สันติ แม้นศิริ. (2556). การแทรกสอดของคลื่นแสง. วันที่ค้นข้อมูล 18 มีนาคม 2558, เข้าถึงได้จาก science.sut.ac.th/physics/Doc/105102/phys2-6.pdf
- สราวุธ เดชะปัญญา. (2552). ปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์สนามใกล้: จากทัศนศาสตร์แบบดั้งเดิมถึงทัศนศาสตร์ควอนตัม. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, ฉบับพิเศษ, 100-108.
- สุรศักดิ์ เชียงกา. (2557). ทัศนศาสตร์เบื้องต้น. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ
- Agarwal, S. & Shakher, C. (2015). In-plane displacement measurement by using circular grating Talbot interferometer. *Optics and Lasers in Engineering*, (75), 63-71.
- Case, W. B., Tomandl, M., Deachapunya, S., & Arndt, M. (2009). Realization of optical carpets in the Talbot and Talbot-Lau configurations. *Optics Express*, 17(23), 20966–20974.
- Deachapunya, S. & Srisuphaphon, S. (2013). Optimization of Transverse Shift inside a near field Talbot Interferometer. *Siam Physics Congress SPC2013*, 363-366.
- Deachapunya, S. & Srisuphaphon, S. (2014). Sensitivity of transverse shift inside a double-grating Talbot interferometer. *Measurement*, 58, 1-5.
- GAUSSIAN BEAM OPTICS. (n.d.). Retrieved from https://marketplace.idexop.com/store/SupportDocuments/All_About_Gaussian_Beam_OpticsWEB.pdf
- Guenther, B. D. (1990). *Modern Optics* (Wiley international ed). Wiley, 391.
- Sanchez-Brea, L. M., Torcal-Milla, F. J., & Bernabeu, E. (2007). Talbot effect in metallic gratings under Gaussian illumination. *Optics communications*, 278 (1), 23-27.
- Srisuphaphon, S. & Deachapunya, S. (in press). The study of wave motion in the Talbot interferometer with a lens. *Wave Motion*.
- Thakur, M., Quan, C., & Tay, C. J. (2007). Surface profiling using fringe projection technique based on Lau effect. *Optics&Laser*, 39(3), 453-459.

ภาคผนวก

วิธีการจำลองความเข้มแสงและการหาความกว้างของกราฟความสัมพันธ์
ระหว่างระยะในแนวแกน x กับความเข้มแสงด้วยโปรแกรม mathematica

```

In[434]= λ = 635 × 10-9; d = 50 × 10-6; k = 2 π / λ; LT = d2;
kd = 2 π / d; f = 0.9; ζ = 50; z = Tan[0.11 Degree] x + LT;
Ψn[x_, z_] = ∑n=-55 If[n ≠ 0, Sin[n π f] / (n π), f] ei n kd (x) - i n2 π LT / d;
Ψm[x_, z_] = ∑m=-55 If[m ≠ 0, Sin[m π f] / (m π), f] e-i m kd (x) - i m2 π LT / d;
Inten[x_] = (Ψn[x, z] Ψm[x, z]);
scale = d / 200;
pw = Plot[Inten[x], {x, 399 d, 400 d}, PlotRange -> All];
cc = Max[Last /@ Level[Cases[pw, _Line, Infinity], {-2}]];
mm = cc / 2;

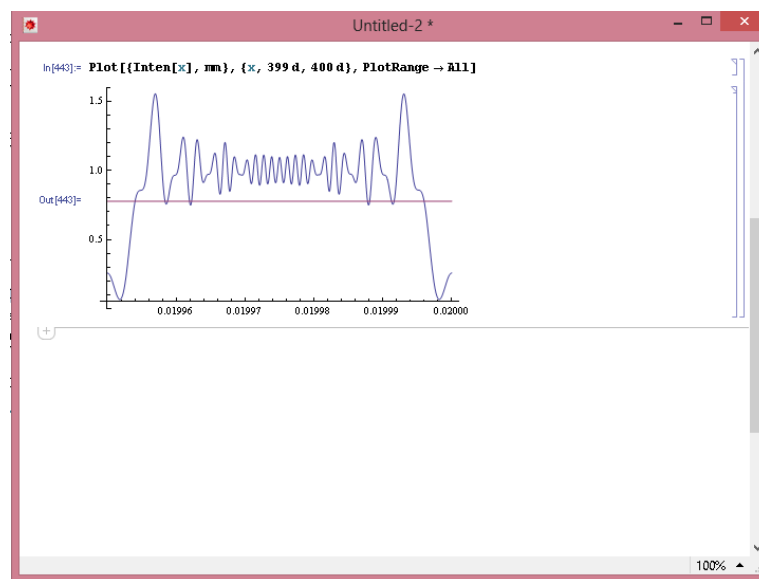
Out[442]= 0.777026

```

ภาพภาคผนวก-1 คำสั่งการหาความเข้มแสงเฉลี่ย

จากภาพภาคผนวก-1 กำหนดตัวแปร ความยาวคลื่น λ คาบของเกรตติง d เลขคลื่น k ระยะทาล์บอด L_T องค์ประกอบของเลขคลื่นในแนวระนาบของเกรตติง k_d อัตราส่วนช่องเปิด f ระยะระหว่างฉากและเกรตติง z ฟังก์ชันคลื่น ψ_n และคอนจูเกตของฟังก์ชันคลื่น $\bar{\psi}_m$ ความเข้มแสง $\text{Inten}[x_]$

ใช้คำสั่ง Plot เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x กับความเข้มแสง และหาความเข้มสูงสุดจากกราฟด้วยคำสั่ง Max หลังหาความเข้มเฉลี่ย



ภาพภาคผนวก-2 คำสั่งและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x กับความเข้มแสง

จากภาพภาคผนวก-2 ใช้คำสั่ง Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะในแนวแกน x กับความเข้มแสง เพื่อดูรูปร่างกราฟ

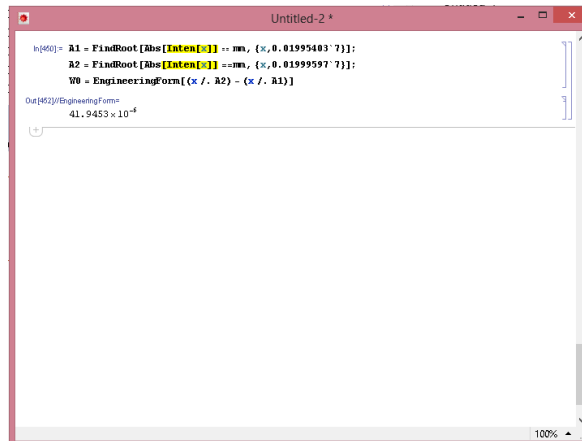
```

Untitled-2
h[444] = AVG = m: PercentDelta = 0.5; scale2 = scale / 50;
Do[DD[x] = If[ (AVG - PercentDelta * AVG) < Abs[Inten[x]] < (AVG + PercentDelta * AVG)
, Abs[Inten[x]], (x, 399 d, 400 d, scale2) ]
, Abs[Inten[x]]], (x, 399 d, 400 d, scale2) ]
Do[If[DD[x] != 0, Print[" x=", N[x, 7], " y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= ",
Abs[Inten[x]]], (x, 399 d, 400 d, scale2) ]
x=0.01995402 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.773877
x=0.01995402 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.775204
x=0.01995403 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.776518
x=0.01995403 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.777819
x=0.01995404 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.779107
x=0.01995404 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.780382
x=0.01995837 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.780889
x=0.01995837 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.779597
x=0.01995838 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.77834
x=0.01995838 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.777118
x=0.01995839 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.775932
x=0.01995839 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.774781
x=0.01995840 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.773665
x=0.01995873 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.773959
x=0.01995874 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.774921
x=0.01995874 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.775904
x=0.01995875 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.776907
x=0.01995875 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.777931
x=0.01995876 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.778975
x=0.01995876 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.780039
x=0.01996192 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.779359
x=0.01996193 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.777552
x=0.01996193 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.775797
x=0.01996194 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.774095
x=0.01996222 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.773399
x=0.01996223 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.775102
x=0.01996223 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.77686
x=0.01996224 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.778674
x=0.01996224 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.780542
x=0.01998776 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.779341
x=0.01998776 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.777499
x=0.01998777 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.775711
x=0.01998777 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.773979
x=0.01998806 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.773271
x=0.01998806 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.774956
x=0.01998807 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.776594
x=0.01998807 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.778485
x=0.01998808 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.780329
x=0.01999123 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.780748
x=0.01999123 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.779659
x=0.01999124 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.778588
x=0.01999124 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.777537
x=0.01999125 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.776506
x=0.01999125 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.775495
x=0.01999126 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.774505
x=0.01999126 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.773537
x=0.01999160 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.773423
x=0.01999161 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.774554
x=0.01999161 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.775719
x=0.01999162 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.77692
x=0.01999162 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.778156
x=0.01999163 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.779427
x=0.01999163 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.780734
x=0.01999596 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.780215
x=0.01999597 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.778922
x=0.01999597 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.777617
x=0.01999598 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.776298
x=0.01999598 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.776298
x=0.01999598 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.774967
x=0.01999599 y=(Q_n[x,z])W_n[x,z]= 0.773623

```

ภาพภาคผนวก-3 การหาค่า x ที่บริเวณตำแหน่งของความเข้มแสงเฉลี่ย

จากภาพภาคผนวก-3 เป็นคำสั่งให้แสดงค่าอันดับ x, y ที่ตำแหน่งของ y มีค่าเท่ากับ ความเข้มข้น และค่าใกล้เคียงค่าความเข้มข้นไม่เกิน $\pm 5\%$ และเลือกค่า x ที่มีค่า y ใกล้เคียงกับความเข้มข้นมา 2 ค่าเพื่อหาความกว้างของกราฟ



```

In[460]:= A1 = FindRoot[Abs[Inten[x]] == mm, {x, 0.0199540377}];
A2 = FindRoot[Abs[Inten[x]] == mm, {x, 0.0199559777}];
Y0 = EngineeringForm[(x /. A2) - (x /. A1)]

Out[462]:= EngineeringForm
41.9453 x 10^-4

```

ภาพภาคผนวก-4 การคำนวณหาความกว้างของกราฟ

จากภาพภาคผนวก-4 เป็นการคำนวณหาความกว้างของกราฟโดยใช้คำสั่ง FindRoot เพื่อหาค่า x ที่ตำแหน่ง y เท่ากับค่าความเข้มข้น จากค่า x ที่เลือกไว้