

การสร้างและทดสอบอินเตอร์เฟซโรบิตอร์ชนิดทิวแมนและกรีน



นาย สยาม ชูถิ่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2525

007539

i 17820637

CONSTRUCTION AND TEST OF TWYMAN AND GREEN INTERFEROMETER

Mr. Siam Choothin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics


Graduate School

Chulalongkorn University


1982

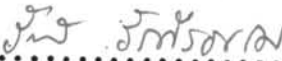
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างและทดสอบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดทิวแมนและกรีน
โดย นายสยาม ชูถิ่น
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ เจริญกุล


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

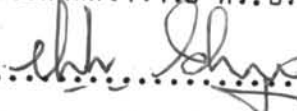

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ระวี ภาวิไล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชณี รักวีรธรรม)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ ไชวเจริญสุข)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ เจริญกุล)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างและทดสอบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดทิวแมนและกรีน
 ชื่อผู้ผลิต นายสยาม ชูถิ่น
 อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิญญู เจริญกุล
 ภาควิชา ฟิสิกส์
 ปีการศึกษา 2524



บทคัดย่อ

อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดทิวแมนและกรีนที่สร้างขึ้น วิธีการสร้างนั้น ได้ทำการออกแบบและสร้างที่สวมใส่ที่คั่นอุปกรณ์ โดยให้ชิ้นงานแต่ละชิ้นสามารถปรับได้ และได้ผ่านฉนวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร จนมีความราบเป็น $\pm \frac{\lambda}{4}$ ($\lambda = 589.3$ นาโนเมตร) แต่ถ้าลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฉนวนเป็น 4 เซนติเมตร ความราบจะเพิ่มเป็น $\pm \frac{\lambda}{8}$ นอกจากนี้ ยังได้ออกแบบเพื่อที่จะผ่านและทดสอบเลนส์รองอีก 2 ตัว แล้วนำมาประกอบเข้ากับที่สวมใส่ที่คั่นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น เป็นอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดทิวแมนและกรีน พร้อมทั้งได้ศึกษาการทำงานและการนำไปใช้ สำหรับอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่สร้างขึ้นนี้ มีความแม่นยำเป็น $\pm \lambda$ ($\lambda = 546.1$ นาโนเมตร) เมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องเปิดเป็น 4 เซนติเมตร แต่ถ้าลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องเปิดเป็น 2 เซนติเมตร ความแม่นยำจะเพิ่มเป็น $\pm \frac{3\lambda}{16}$ เมื่อแทนชุดเลนส์และกระจกที่ผ่นเอง ด้วยชุดเลนส์และกระจกที่ซื้อมา พบว่าความแม่นยำของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ไม่ดีขึ้น ในด้านการนำไปใช้ ถึงแม้ว่า อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นี้ จะมีความคลาดเชิงหน้าคลื่นเหลืออยู่ แต่ก็สามารถที่จะนำไปใช้ในการศึกษาฉนวน และความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ของที่คั่นอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์ขั้นต้น ๆ ได้

2

Thesis Title Construction and test of Twyman and Green interferometer
Name Mr. Siam Choothin
Thesis Advisor Assistant Professor Pinyo Charoenkul
Department Physics
Academic Year 1981

ABSTRACT

For a Twyman and Green interferometer the mountings of optical components were designed and constructed; all of which were made adjustable. The 5 centimeters diameter flat surfaces were ground and polished to about $\pm \frac{\lambda}{4}$ ($\lambda = 589.3$ nanometers). In case the surface area is reduced to 4 centimeters diameter, the flatness is increased to about $\pm \frac{\lambda}{8}$. Two achromatic lenses were also designed, ground and tested. The interferometer was then assembled; and its performance was studied. The accuracy of the interferometer was found to be $\pm \lambda$ ($\lambda = 546.1$ nanometers) for the beam of 4 centimeters diameter. The accuracy is increased to $\pm \frac{3\lambda}{16}$ if the diameter of testing beam is reduced to 2 centimeters. Through replacing the constructed lens and mirrors with the imported ones, the interferometer showed no improvement in accuracy. Although there remains considerable amount of wavefront aberration, the constructed instrument is quite useful for the study of the surface flatness and inhomogeneity in optical materials as used in students' laboratories.



กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง ในความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญญา เจริญกุล อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งสั่งสอน และชี้แนะในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทั้งทางปฏิบัติและวิชาการ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ยังได้รับความกรุณาจากคณาจารย์ในภาควิชาฟิสิกส์ ดังต่อไปนี้ รองศาสตราจารย์ ดร.รัชณี รักวีระธรรม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ โข้วเจริญสุข ที่ได้ช่วยแนะนำและชี้แนะการแก้ปัญหาต่าง ๆ รองศาสตราจารย์ ถาวร สุทธิพงศ์ ที่ช่วยแปลงานพิมพ์ภาษาฝรั่งเศสซึ่งให้แง่คิดที่กว้างขึ้น ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญญา บัณฑิตกุล ที่ให้ความกรุณาใช้อุปกรณ์สำหรับฉาบผิว และควบคุมการฉาบด้วยตัวเอง จึงต้องขอขอบพระคุณในความกรุณามา ณ ที่นี้ สำหรับด้านการสร้างอุปกรณ์ ต้องขอขอบคุณในความร่วมมือ ของโรงงานคณะวิทยาศาสตร์ และโรงงานภาควิชาฟิสิกส์ ที่ช่วยทำและประกอบชิ้นงานบางอย่าง และคุณวุฒิพงษ์ นิยมจันทร์ แห่งสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ช่วยให้แง่คิดและแนะนำเทคนิคในการปฏิบัติงานทางช่างกล

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณวิไล คำแดงไสย ที่ช่วยพิมพ์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณต่อเพื่อน ๆ และที่ ๆ ทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือทั้งทางตรงและทางอ้อมแต่มิได้กล่าวถึง

สารบัญ



หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	๙
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..	๑๑
กิตติกรรมประกาศ	๑๒
รายการตารางประกอบ	๑๓
รายการรูปประกอบ.....	๑๔
บทที่	
1 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดทิวแมนและกรีน	1
1 บทนำ	1
2 ความหมายและหลักการทั่วไปของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์.....	1
3 ชนิดของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์..	2
3.1 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดสองลำแสง.....	2
3.2 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดหลายลำแสง..	3
3.3 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดอื่น ๆ	3
4 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดทิวแมนและกรีน.....	3
4.1 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสัน.....	4
4.1.1 หลักการ.....	4
4.1.2 รั้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้น	5
4.2 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดทิวแมนและกรีน.....	12
4.2.1 หลักและประวัติ.....	12
4.2.2 วิธีการดัดแปลงของทิวแมนและกรีน.....	13
4.2.3 รั้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้น	14
4.2.3.1 รั้วการแทรกสอดเมื่อยังไม่มีห้ค้นอุปกรณ์.....	14
4.2.3.2 รั้วการแทรกสอดเมื่อมีห้ค้นอุปกรณ์..	17

บทที่

หน้า

4.2.3.2.1	วิธีการแทรกสอดจากการสะท้อนที่ผิวของทัศนอุปกรณ์.....	17
4.2.3.2.2	วิธีการแทรกสอดที่เกิดจากลำแสงหนึ่งผ่านทัศนอุปกรณ์.....	18
4.2.3.2.3	วิธีการแทรกสอดที่เกิดจากลำแสงหนึ่งผ่านเลนส์.....	20
2	การออกแบบสร้างอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดทิวแมนและกรีน.....	22
1	งานเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดแสง.....	22
1.1	แหล่งกำเนิดของแสง.....	22
1.2	การแบ่งประเภทของแหล่งกำเนิดแสง.....	22
1.3	การเลือกแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในงาน.....	23
1.4	การออกแบบที่ใช้หลอดกำเนิดแสง.....	23
2	งานทางอย่างกล.....	24
3	งานทางทัศน.....	33
3.1	การทำให้ได้รูปที่ต้องการอย่างหายบ.....	33
3.2	การผันผิทางทัศน.....	34
3.2.1	วิธีการผันผิทางทัศน.....	34
3.2.2	ชนิดของการผันแบ่งตามวัสดุที่ใช้ผัน.....	36
3.2.3	ขั้นตอนการผัน.....	37
3.2.3.1	การผันอย่างหายบ.....	37
3.2.3.2	การผันอย่างละเอียด.....	38
3.2.3.3	การขัดไล่.....	40
3.3	การผันผิวนราบและการทดสอบ.....	41
3.3.1	การผันผิวนราบ.....	42
3.3.2	การทดสอบผิวนราบ.....	42
3.3.3	การตีความจากรี้วการแทรกสอด.....	44
3.3.4	การสังเกตรี้วการแทรกสอด.....	46
3.3.5	ข้อพึงระวังในการทดสอบ.....	46
3.3.6	การขัดแก้ให้ผิวนราบ.....	46

บทที่	หน้า
3.3.5.1 การเตรียมแท่นพิทช์	46
3.3.6.2 วิธีการขัด	47
3.3.7 ชิ้นงานที่ทำ	48
3.4 การออกแบบและแผ่นเลนส์อรงค์	50
3.4.1 การออกแบบ	50
3.4.2 การดำเนินงานการแผ่นเลนส์	55
3.4.3 การประกบเลนส์	56
3 การฉาบผิวและการทดสอบเลนส์	57
1 การฉาบผิว	57
2 วิธีการฉาบผิว	57
3 การฉาบผิวโดยการทำให้โลหะกลายเป็นไอในสูญญากาศ	58
3.1 หลักการ	58
3.2 วิธีการฉาบ	59
3.3 ตัวให้ความร้อนและโลหะที่จะใช้ฉาบ	60
3.4 องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ได้จากการฉาบ	60
4 การทดสอบเลนส์ที่ผ่านขึ้น	61
4.1 ขนาดและความหนาของเลนส์	61
4.2 การหาค่ามีความโค้งของแต่ละผิวของเลนส์	62
4.2.1 การหาค่ามีความโค้งของเลนส์นูน	63
4.2.2 การหาค่ามีความโค้งของผิวเว้าของเลนส์เว้า	63
4.2.3 การหาค่ามีความโค้งของผิวเกือบราบของเลนส์เว้า	64
4.2.4 ผลการทดสอบ	65
4.3 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์อรงค์	75
4.3.1 หลักการ	75
4.3.2 วิธีการและผลการหาความยาวโฟกัสโดยพิจารณากำลังขยาย	77

บทที่

หน้า

4.4	การทดสอบเพื่อพิจารณาคุณภาพของเลนส์	80
4.4.1	พิจารณาความคลาดของเลนส์โดยการแกะรอยรังสี	80
4.4.1.1	วิธีการ	82
4.4.1.2	ผลการแกะรอยรังสี	83
4.4.2	พิจารณาความคลาดของเลนส์โดยการทดลอง	89
4.4.2.1	โดยวิธีอาร์ตแมน	89
4.4.2.2	การทดสอบด้วยคมมีด	93
4.4.2.3	การทดสอบโดยใช้เกรตติงของรอนยี	97
5	การทดสอบเลนส์ที่ข้อ	101
5.1	การวัดความยาวโฟกัส	101
5.2	ศึกษาความคลาดโดยวิธีอาร์ตแมน	104
5.3	ศึกษาความคลาดโดยวิธีใช้คมมีด	104
5.4	ศึกษาความคลาดโดยใช้เกรตติงของรอนยี	104
6	สรุปผลการทดสอบเลนส์	108
4	ความแม่นยำของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่สร้างและการนำไปใช้งาน ..	110
1	การจัดเตรียมอุปกรณ์ชิ้นแรก	110
2	ความคมชัดของริ้วการแทรกสอด	112
3	การถ่ายภาพริ้วการแทรกสอดจากอุปกรณ์	114
4	ความแม่นยำของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่สร้าง	114
5	การนำอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่สร้างขึ้นไปใช้งาน	116
5.1	การศึกษาคุณภาพของกระจกที่เข้ามาและแผ่นเอง	117
5.2	การศึกษาความบกพร่องภายในของแก้ว	121
5.3	การศึกษาความบกพร่องภายในของปริซึม	122
5	สรุปและข้อเสนอนะ	126
1	สรุป	126
2	ข้อเสนอนะ	126

บทที่	หน้า
เอกสารอ้างอิง	130
ภาคผนวก ก	132
ภาคผนวก ข	133
ประวัติ	137

รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงความหนาและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์กระจกทั้งสองชุด	61
3.2 แสดงการหารัศมีมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์กระจกที่ 1 โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน . . .	67
3.3 แสดงการหารัศมีมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์กระจกที่ 1 โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน . . .	68
3.4 แสดงการหารัศมีมีความโค้งของผิวบนอ้างอิง R_2 โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน	69
3.5 แสดงการหารัศมีมีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์กระจกที่ 1 เทียบกับผิวบนอ้างอิง R_2 โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน	70
3.6 แสดงการหารัศมีมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์กระจกที่ 2 โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน . . .	71
3.7 แสดงการหารัศมีมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์กระจกที่ 2 โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน . . .	72
3.8 แสดงการหารัศมีมีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์กระจกที่ 2 เทียบกับผิวบนอ้างอิง R_2 โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน	73
3.9 แสดงรัศมีมีความโค้งของผิวต่าง ๆ ของเลนส์กระจกทั้งสองชุด	74
3.10 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์กระจกที่ 1 โดยพิจารณาก่าสังขยาย	78
3.11 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์กระจกที่ 2 โดยพิจารณาก่าสังขยาย	79
3.12 การแกะรอยรังสีของเลนส์กระจกที่ 1	84-85
3.13 การแกะรอยรังสีของเลนส์กระจกที่ 2	86-87
3.14 สรุปลผลการคำนวณค่า ส.ป.ล. ความคลาดต่าง ๆ ของเลนส์กระจกที่ฝนขึ้น โดยการ แกะรอยรังสี	88
3.15 แสดงความคลาดทรงกลมเชิงรังสีของเลนส์กระจกที่ฝนขึ้นเอง โดยการแกะรอยรังสี	88
3.16 แสดงผลการหาตำแหน่งของจุดโฟกัส ของรังสีจากโชนต่าง ๆ ของเลนส์กระจกที่ 1 โดยวิธีอาร์ตแมน	91
3.17 แสดงผลการหาตำแหน่งของจุดโฟกัส ของรังสีจากโชนต่าง ๆ ของเลนส์กระจกที่ 2 โดยวิธีอาร์ตแมน	92

ตารางที่	หน้า
3.18 แสดงผลการหาความยาวโฟกัส ของเลนส์รวมค้ำเข้ามา โดยวิธีพิจารณากำลังขยาย ..	103
3.19 แสดงผลการหาดำแหน่งของจุดโฟกัสของรังสีจากโขนต่าง ๆ ของเลนส์รวมค้ำเข้ามา โดยวิธีอาร์ตแมน	105
3.20 สรุปลผลการทดสอบเลนส์รวมค้ำที่ผันขึ้นเอง โดยวิธีต่าง ๆ กัน.....	108
3.21 สรุปลผลการทดสอบเลนส์รวมค้ำที่เข้ามา โดยวิธีต่าง ๆ กัน	109
4.1 สรุปลผลการทดสอบฉนวนที่ผันขึ้นเอง ก่อนที่จะฉาบให้เป็นฉนวนสะท้อนแสงโดยใช้แผ่นฉาบ มาตรฐาน กับ ผลการทดสอบฉนวนที่ผันขึ้นเอง เมื่อฉาบให้เป็นฉนวนสะท้อนแสงแล้ว โดยใช้อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่สร้างขึ้น	119

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดโมเดลล์น	4
1.2 รั้วการแทรกสอดเมื่อกระจก M_1 และกระจกเส้นมือน M_2' ยนานกัน θ ตำแหน่งต่าง ๆ กัน	6
1.3 รั้วการแทรกสอดเมื่อกระจก M_1 และกระจกเส้นมือน M_2' เขียงทำมุมกันเล็กน้อย	6
1.4 ระยะทางที่คั่น $2t$ ระหว่างจุดกำเนิดแสงอาพันธ์เส้นมือน S_1 และ S ในแหล่งกำเนิดแสงเส้นมือน M_1 และ M_2' ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนตามตำแหน่งของจุดกำเนิดแสงเส้นมือนคู่ต่าง ๆ กัน	8
1.5 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดโมเดลล์น	13
1.6 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดทิวแมนและกรีน	13
1.7 การเกิดรั้วการแทรกสอดจากคลื่นยนาน	15
1.8 การตัดอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบดิรราบสะท้อนแสง M	17
1.9 รั้วการแทรกสอดที่ได้จากการตรวจสอบดิรราบสะท้อนแสง M	17
1.10 การตัดอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบเนื้อของแผ่นแก้วใส	19
1.11 การตัดอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบเนื้อของปริซึม	19
1.12 การตัดอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบความคลาดของเลนส์ L	21
2.1 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น	24
2.2 ภาพฉายส่วนบนแสดงแบบหัวไปของอุปกรณ์	27
2.3 ภาพถ่ายอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดทิวแมนและกรีนที่สร้างขึ้น	27
2.4 แสดงชิ้นงานหมายเลข (1) - (5)	28
2.5 แสดงชิ้นงานหมายเลข (6) และ (6')	29
2.6 แสดงชิ้นงานหมายเลข (7)	30
2.7 แสดงชิ้นงานหมายเลข (8)	31
2.8 แสดงชิ้นงานหมายเลข (9)	32

รูปที่	หน้า
2.9 การตัดแก้วโดยใช้โลหะบางรูปทรงกระบอก	34
2.10 ลักษณะการฝนโดยกดแท่นฝนอย่างเดียว	35
2.11 ลักษณะการฝนโดยเลื่อนแท่นฝนไปมา	35
2.12 การฝนผิวหมุนโดยใช้หัวขัดกากเพชร	39
2.13 การฝนผิวเว้าโดยใช้หัวขัดกากเพชร	39
2.14 แท่นฝนที่ใช้ฝนผิวแบบต่าง ๆ	40
2.15 การจัดอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบความราบในโรงงาน	43
2.16 การจัดอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบความราบในห้องปฏิบัติการ	43
2.17 การตีความรั้วการแทรกสอด	44
2.18 การหาส่วนโค้งที่ยังเหลืออยู่	45
2.19 แท่นพิชย์แบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการขัดแก้ให้ได้ผิวราบ	46
2.20 แท่นพิชย์รูปวงแหวน	47
2.21 รั้วการแทรกสอดจากผิวที่ฝนขึ้นเอง เทียบกับผิวราบมาตรฐาน	49
2.22 เลนส์ออร์คี่	51
2.23 เลนส์บางในอากาศ	52
2.24 แสดงแกนमुख्यสำคัญของเลนส์นูน ซึ่งเป็นเส้นตรงที่ผ่านจุด C_1 และ C_2	55
2.25 แท่นยึดในการประกบเลนส์	56
3.1 อุปกรณ์สำหรับลาบผิว	59
3.2 รูปลักษณะต่าง ๆ ของตัวให้ความร้อน	60
3.3 การหาค่ารัศมีมีความโค้ง โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน	62
3.4 การตรวจสอบผิวราบโดยใช้แผ่นราบมาตรฐาน	64
3.5 การหาความยาวโฟกัสโดยพิจารณากำลังขยาย	75
3.6 การหักเหของรังสีใกล้แกน ผ่านผิวหักเห 2 ผิว	80
3.7 รังสีที่ใช้ในการแกะรอยรังสีเพื่อพิจารณาความคลาด	83
3.8 การทดสอบเลนส์โดยวิธีอาร์ตแมน	89
3.9 ตำแหน่งโฟกัสของรังสีจากโชนต่าง ๆ ของเลนส์ออร์คี่ที่ 1	93
3.10 ตำแหน่งโฟกัสของรังสีจากโชนต่าง ๆ ของเลนส์ออร์คี่ที่ 2	93

รูปที่	หน้า
3.11 ภาพแสดงผลการทดสอบเลนส์รังสีที่ 1 โดยใช้คมมีด	95
3.12 ภาพแสดงผลการทดสอบเลนส์รังสีที่ 2 โดยใช้คมมีด	96
3.13 การตีความภาพ 3.9 ในเชิงรังสี	97
3.14 การตีความภาพ 3.10 ในเชิงรังสี	97
3.15 การเกิดริ้วจากเกรตติงของรอนซี โดยวิธีทางเรขาคณิตของเลนทซ์	98
3.16 ภาพแสดงผลการทดสอบเลนส์รังสีที่ 1 โดยใช้เกรตติงของรอนซี	102
3.17 ภาพแสดงผลการทดสอบเลนส์รังสีที่ 2 โดยใช้เกรตติงของรอนซี	102
3.18 ภาพแสดงผลการทดสอบเลนส์รังสีที่ 1 ที่เข้ามาโดยใช้คมมีด	106
3.19 ภาพแสดงผลการทดสอบเลนส์รังสีที่ 2 ที่เข้ามาโดยใช้คมมีด	106
3.20 ภาพแสดงผลการทดสอบเลนส์รังสีที่ 1 ที่เข้ามาโดยใช้เกรตติงของรอนซี	107
3.21 ภาพแสดงผลการทดสอบเลนส์รังสีที่ 2 ที่เข้ามาโดยใช้เกรตติงของรอนซี	107
4.1 การหาตำแหน่งโฟกัสของเลนส์โดยวิธีนอน-ปาราแลกซ์	111
4.2 ภาพแสดงริ้วการแทรกสอดจากอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่สร้าง เมื่อใช้ชุดเลนส์และกระจก คู่ต่าง ๆ กัน	113
4.3 ความคลาดเชิงหน้าคลื่นบวก	116
4.4 ความคลาดเชิงหน้าคลื่นลบ	116
4.5 ภาพริ้วการแทรกสอดจากอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่สร้าง เมื่อใช้ทดสอบผิวกระจกต่าง ๆ ..	118
4.6 ภาพริ้วการแทรกสอดจากอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่สร้าง เมื่อใช้ทดสอบความบกพร่องภายใน ของแก้วชนิดต่าง ๆ	123
4.7 ก. การวัดอุปกรณ เพื่อตรวจสอบความบกพร่องภายในของปริซึม 60 องศา	124
4.7 ข. ริ้วการแทรกสอด ที่ได้จากการตรวจสอบปริซึม 60 องศา อันหนึ่ง ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	124
4.8 ก. การวัดอุปกรณ เพื่อตรวจสอบความบกพร่องภายในของปริซึม 45 องศา	124
4.8 ข. ริ้วการแทรกสอด ที่ได้จากการตรวจสอบปริซึม 45 องศา อันหนึ่ง ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	124
5.1 ภาพริ้วการแทรกสอด เมื่อลดช่องเปิดหน้าเลนส์ ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 2 เซนติเมตร เมื่อกระจกทาบมุมกันเล็กน้อย และเมื่อกระจกตั้งฉากกันจริง ๆ โดยใช้ชุดกระจกและเลนส์ ต่าง ๆ กัน	128