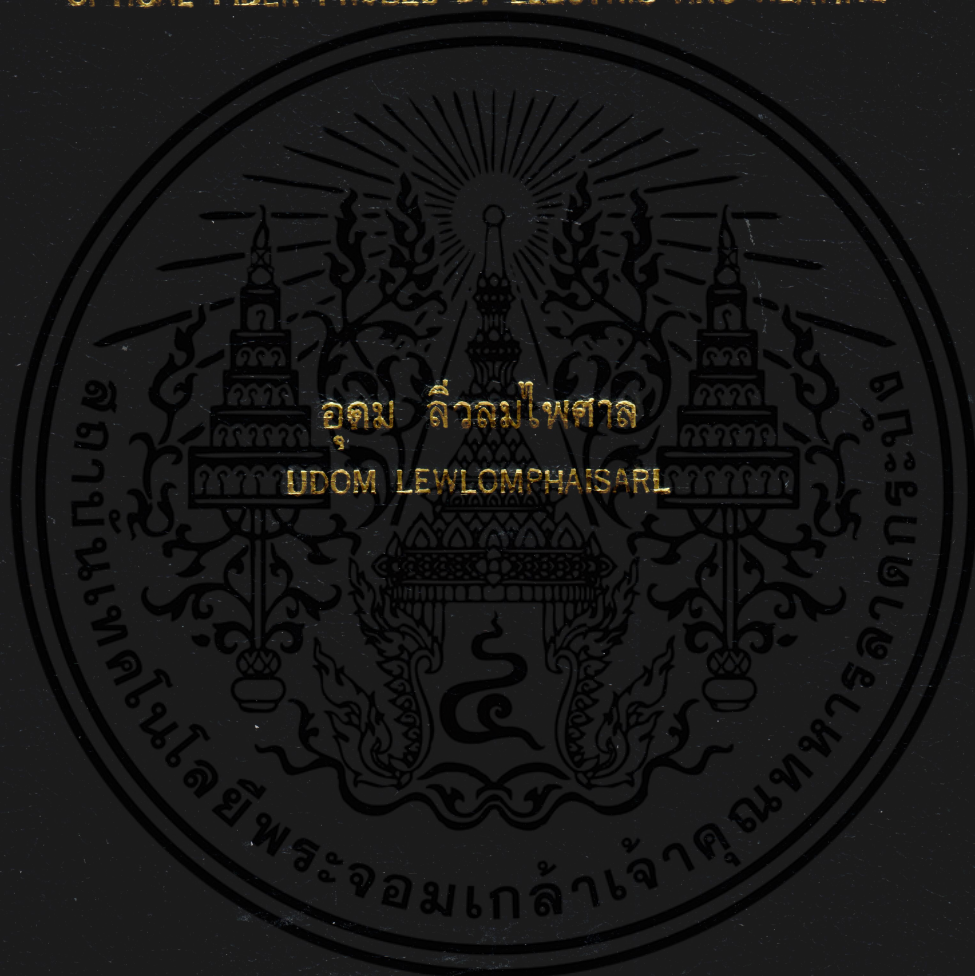


การผลิตโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอแบบ NEAR-FIELD
ที่สามารถควบคุมได้ โดยวิธีการอาร์กด้วยไฟฟ้า

CONTROLLABLE FABRICATION OF BENT NEAR-FIELD
OPTICAL FIBER PROBES BY ELECTRIC ARC HEATING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-559-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การผลิตโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอแบบ near-field
ที่สามารถควบคุมได้โดยวิธีการอาร์กด้วยไฟฟ้า

CONTROLLABLE FABRICATION OF BENT NEAR-FIELD
OPTICAL FIBER PROBES BY ELECTRIC ARC HEATING



อุดม ลีवलมไพศาล
UDOM LEWLOMPHAISARL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-559-1

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 33889
วัน, เดือน, ปี 17 ก.ย. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONTROLLABLE FABRICATION OF BENT NEAR-FIELD OPTICAL
FIBER PROBES BY ELECTRIC ARC HEATING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONG'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1999

ISBN 974-622-559-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตโพรบใยแก้วนำแสงชนิดจอแบบ near-field ที่สามารถควบคุม
ได้โดยวิธีการอาร์กด้วยไฟฟ้า

CONTROLLABLE FABRICATION OF BENT NEAR-FIELD
OPTICAL FIBER PROBES BY ELECTRIC ARC HEATING

ชื่อนักศึกษา นายอุดม ลีวลมไพศาล

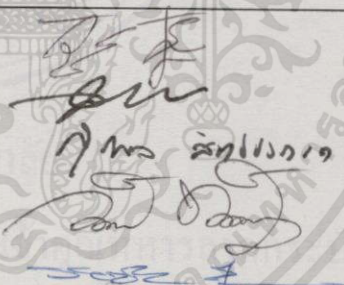
รหัสประจำตัว 37061138

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วันชัย ธีรรัฐจา

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ศ.ดร.ไพรัช รัชชพยง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ	จิตติรุ่งเรือง	
ดร.สุทธิชัย	นพนาถิพงษ์	
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวกาถ	
รศ.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.ดร.วันชัย	ธีรรัฐจา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 20 กรกฎาคม 2542 เวลา 10.00 - 12.00 น.

สถานที่สอบ ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น ชั้น 4 ห้อง (E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.มนตรี สงวรศิลป์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....3.....เดือน.....กุมภาพันธ์.....พ.ศ.....2542

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตโพรบใยแก้วนำแสงชนิดอแบบ near-field
ที่สามารถควบคุมได้โดยวิธีการอาร์กด้วยไฟฟ้า

นักศึกษา

อุดม ลีวลมไพศาล

รหัสประจำตัว

37061138

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2542

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ. ดร. วันชัย ธีรวัจจา

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ศ. ดร. ไพรัช ธีรพงษ์

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการผลิตโพรบอที่มีปลายขนาดเล็ก จากใยแก้วนำแสง ด้วยวิธีการให้ความร้อนด้วยการอาร์กด้วยไฟฟ้า ทำให้สามารถผลิตโพรบอที่มีมวง 30 ถึง 75 องศา และความยาวอยู่ในช่วงระหว่าง 600 ถึง 900 ไมโครเมตรได้ โดยมีขนาดของปลายอยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 200 นาโนเมตร เพื่อใช้เป็นท่อนำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไปยังพื้นผิวของตัวอย่าง และด้วยกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสที่ใช้โพรบซิลิกอนความละเอียดสูง โพรบอในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ถูกนำไปแทนที่โพรบซิลิกอน โดยที่ไม่ต้องมีการดัดแปลงกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสแต่อย่างใด เพื่อเป็นการทำให้กล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสสามารถปฏิบัติการเป็นกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field ได้อีกด้วย

Thesis Title	Controllable fabrication of bent near-field optical fiber probes by electric arc heating
Student	Udom Lewlomphaisarl
Student ID	37061138
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	1999
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Vanchai Riewruja
Thesis Co-Advisor	Prof. Dr. Pairash Thajchayapong

ABSTRACT

We describe the construction of a high voltage electric arc puller for controllable fabrication of bent near-field optical fiber probes. Various probes with bent angles ranging from 30 degree to 75 degree and bent length between 600 and 900 um were successfully produced. The tip diameters achieved are between 100 and 200 nm. These bent type probes can be made into cantilevered probes that can be used for any dynamic mode atomic force microscope, and make the construction of a scanning near-field optical microscope easily attainable.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. วันชัย ธีรจุฑา และศ. ดร.ไพรัช ธัชยพงษ์ ที่กรุณาช่วยชี้แนวทางแก้ไขงานวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบคุณ Dr. Huang Wein-hsiao ผู้อำนวยการของ Precision Instrument Development Center (PIDC) ที่ให้ทุนในการไปทำวิจัยที่ Surface Analysis Lab (SAL) ณ ประเทศไต้หวันเป็นเวลา 10 เดือน และขอขอบคุณ Dr. Lin Hua-nan หัวหน้า SAL ที่ให้คำแนะนำและเป็นทีปรึกษา และขอขอบคุณ Ms. Kuo Wein-jiann และ Miss Chai Wein-junn ที่ช่วยติดต่อประสานให้เป็นอย่างดี ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัยอยู่ที่ประเทศไต้หวัน

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ และดร.พันธ์ศักดิ์ หัวหน้าห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ ที่อนุญาตให้ลาศึกษาต่อได้

และขอขอบคุณ ดร.วิริยะ ชูปวีณ อาจารย์สว่าง เลิศธีรสุนทร คุณกมล เอื้อชินกุล คุณนิศافر เกียรติไพศาลโสภณ และคุณสุวรรณี วงศ์ศิริขจร ที่คอยให้คำแนะนำและชี้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนเพื่อนๆ ที่ Lab ให้ความช่วยเหลือทุกสิ่งทุกอย่างจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

และหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ มีคุณค่าต่อสังคมและประเทศชาติ ผู้วิจัยขอมอบความดีนี้แด่ บิดามารดา และครอบครัว ที่คอยดูแลเอาใจใส่ คอยเป็นกำลังใจด้วยความรักในพระเจ้าตลอดเวลา

อุดม ลีวลมไพศาล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	II
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 การดำเนินการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานทางแสง.....	4
2.1 การเลี้ยวเบน (Diffraction).....	5
2.1.1 การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ที่ช่องแคบเดี่ยว.....	5
2.1.2 การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ที่ช่องแคบกลม.....	9
2.2 ข้อจำกัดของการเลี้ยวเบน (Diffraction limited).....	11
2.3 ความคลาด (Aberration).....	14
2.3.1 ความคลาดทรงกลม (Spherical aberration).....	14
2.3.2 โคมา (Coma).....	16
2.3.3 ความคลาดเพี้ยน (Distortion).....	16
2.3.4 ความคลาดโค้ง (Field curvature).....	17
2.3.5 ความคลาดเฉียง (Astigmatism).....	18
2.3.6 ความคลาดตรงค์ (Chromatic aberration).....	18
2.4 โยแก้วนำแสง (Fiber optic).....	19
2.5 เลเซอร์.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 กล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (Optical microscope).....	29
2.7 กล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส (Atomic force microscope).....	32
2.7.1 การทำงานในโหมดสัมผัส.....	34
2.7.2 การทำงานในโหมดแตะ.....	35
2.8 กล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field.....	36
2.9 สรุป.....	38
บทที่ 3 การพัฒนาเครื่องดึงและงอใยแก้วนำแสง.....	39
3.1 เครื่องดึงใยแก้วนำแสง (Optical fiber puller machine).....	39
3.1.1 เครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง (AC High voltage power supply).....	39
3.1.2 เครื่องกลจับยึดใยแก้วนำแสง.....	43
3.1.2.1 ฐานยึดใยแก้วนำแสง T5.....	44
3.1.2.2 แท่นยึดเข็มไฟฟ้าแรงดันสูง.....	44
3.1.2.3 ตัวดึงใยแก้วนำแสง.....	45
3.1.3 ตัวควบคุมเตปิ้งมอเตอร์.....	45
3.2 การดึงใยแก้วนำแสง.....	46
3.2.1 โปรแกรมควบคุมการดึงใยแก้วนำแสงแบบที่ 1 (TEST1.PRG).....	47
3.2.1 โปรแกรมควบคุมการดึงใยแก้วนำแสงแบบที่ 2 (TEST2.PRG).....	49
3.2.1 โปรแกรมควบคุมการดึงใยแก้วนำแสงแบบที่ 3 (TEST3.PRG).....	50
3.2.1 โปรแกรมควบคุมการดึงใยแก้วนำแสงแบบที่ 4 (TEST5.PRG).....	53
3.3 การงอใยแก้วนำแสง ที่ผ่านการดึงแล้ว.....	56
3.4 การเคลือบผิวของใยแก้วนำแสง ด้วยทองคำ.....	62
3.5 การยึดใยแก้วนำแสงชนิดงอเข้ากับฐานอลูมิเนียม เพื่อทำเป็นแคนทิลิวอร์.....	63
3.6 การติดตั้งแคนทิลิวอร์เข้ากับตัวยึดโพรบชนิดงอ (Bent probe holder).....	66
3.7 การติดตั้งตัวยึดโพรบชนิดงอเข้ากล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส.....	68
3.8 การปฏิบัติการบนกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส.....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 สรุป.....	72
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	73
4.1 การทดลองหาภาพภูมิประเทศของโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอกับเกรตติง ขนาด 1 ไมโครเมตร.....	73
4.2 การทดลองหาภาพภูมิประเทศของโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอกับโมเลกุล โพลีเมอร์ขนาด 500 นาโนเมตร.....	78
4.3 การทดลองหาภาพเชิงแสงของโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอกับโพลีเมอร์ขนาด 500 นาโนเมตร.....	80
4.4 สรุป.....	82
บทที่ 5 บทสรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อ.....	83
5.1 บทสรุป.....	83
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	83
5.3 การพัฒนาต่อไป.....	83
5.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	85
เอกสารอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	90
ภาคผนวก ค.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการดึงใยแก้วนำแสง.....	46
3.2 โปรแกรม Test1.prg.....	48
3.3 โปรแกรม Test2.prg.....	49
3.4 โปรแกรม Test3.prg.....	51
3.5 โปรแกรม Test4.prg.....	52
3.6 โปรแกรม Test5.prg.....	53
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้ความร้อนกับค่าเฉลี่ยมุมมองของใยแก้วนำแสง...57	



สารบัญรูป

รูปที่.....	หน้า
2.1 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่น.....	5
2.2 แสดงการเลี้ยวเบนของแสงขนานผ่านช่องแคบ.....	6
2.3 ความเข้มของแสงเลี้ยวเบน.....	8
2.4 มุมที่รองรับโดยแถบสว่างตรงกลางของการเลี้ยวเบนฝ่ายช่องแคบ.....	8
2.5 กำลังแยกของช่องแคบ.....	9
2.6 ภาพลวดลายการเลี้ยวเบนจากช่องแคบกลม.....	10
2.7 มุมที่รองรับโดยรั้วของการเลี้ยวเบนจากช่องแคบกลม.....	10
2.8 กำลังแยกของช่องแคบกลม.....	11
2.9 แสดง Airy's Disk ของจุดสองจุดที่อยู่ใกล้กันและยังสามารถแยกออกเป็น 2 จุด.....	12
2.10 แสดง Airy's Disk ของจุดสองจุดที่ไม่สามารถแยกออกว่าเป็นจุด 2 จุด.....	12
2.11 ความคลาดทรงกลมของกระจกโค้ง.....	14
2.12 กระจกโค้งรูปทรงรีที่ไม่มีความคลาดทรงกลม.....	15
2.13 กระจกโค้งรูปพาราโบล่าที่ไม่มีความคลาดทรงกลม.....	15
2.14 ความคลาดทรงกลมของเลนส์.....	16
2.15 แสดงการหักเหของรังสีต่าง ๆ จากวัตถุที่อยู่ทั้งที่แกนและนอกแกน.....	16
2.16 ความคลาดเพี้ยนของจอภาพ (a) ปกติ (b) โค้งเข้า และ (c) โค้งออก.....	17
2.17 ความคลาดโค้ง.....	17
2.18 ความคลาดเอียง.....	18
2.19 ความคลาดรงค์.....	19
2.20 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของใยแก้วนำแสง.....	20
2.21 การหักเหและการสะท้อนของแสง กรณี (a) $n_1 < n_2$ และกรณี (b) $n_1 > n_2$	20
2.22 แสดงการสะท้อนกลับหมดของแสงเมื่อผ่านปริซึมแก้ว.....	21
2.23 แสดงการแพร่กระจายของแสงในท่อนำแสง.....	22
2.24 แสดงแสงที่วิ่งเข้าไปในใยแก้วนำแสง.....	22
2.25 แสดงการเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในของท่อนำแสงโค้ง.....	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่.....	หน้า
2.26 แสดงโครงสร้างของใยแก้วนำแสงที่ประกอบไปด้วย Core, Cladding และ Jacket.....	25
2.27 (a) การดูกล้องรังสี (b) การแผ่รังสีเองตามปกติ (c) การแผ่รังสีโดยการกระตุ้น.....	26
2.28 ระดับพลังงานของสารที่เหมาะสมเป็นต้นกำเนิดแสงเลเซอร์ (a) สุปิอิเล็กตรอนจาก E_0 ไป E_1 (b) อิเล็กตรอนไปออกันที่ E_1 (c) อิเล็กตรอนที่ E_1 ถูกกระตุ้นให้แผ่รังสี.....	27
2.29 การผลิตเลเซอร์จากผลึกทับทิม.....	28
2.30 ระดับพลังงานของอะตอมโครเมียม.....	28
2.31 แสดงการสร้างภาพของกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง.....	29
2.32 กำลังแยกขยายของตา.....	31
2.33 แสดงกล้องจุลทรรศน์กลับด้าน.....	32
2.34 แสดงหัวของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส.....	33
2.35 แสดงการโฟกัสแสงบนแคโทดลิโวลต์ ของหัวกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส.....	34
2.36 แสดงการทำงานในโหมดแต่ละ.....	35
2.37 การทำงานทั้ง 6 โหมดของกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field (a) Collection mode (b) Illumination mode (c) Collection and illumination mode (d) Oblique mode (e) Oblique and illumination mode (f) Dark field mode.....	37
3.1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องดิงใยแก้วนำแสง.....	40
3.2 แสดงวงจรของเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง.....	41
3.3 แสดงภาพถ่ายด้านบนของเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง.....	42
3.4 แสดงภาพถ่ายด้านข้างของเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง.....	43
3.5 แสดงภาพถ่ายของตัวปรับ T5 ตัวจับเข็มไฟฟ้าแรงดันสูงของหัวลบและหัวบวก.....	43
3.6 แสดงภาพถ่ายของตัวปรับ T1 T2 T3 ทางซ้าย และ T5 ตรงกลาง.....	44
3.7 แสดงภาพถ่ายของเข็มไฟฟ้าแรงดันสูงในระยะใกล้.....	45
3.8 แสดงใยแก้วนำแสงที่ดิงได้ตามโปรแกรม test1.prg ที่อัตราขยาย 50 เท่า.....	49
3.9 แสดงใยแก้วนำแสงที่ดิงได้ตามโปรแกรม test3.prg ที่อัตราขยาย 50 เท่า.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่.....	หน้า
3.10 แสดงใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งได้ตามโปรแกรม test3.prg ที่อัตราขยาย 50 เท่า.....	51
3.11 แสดงใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งได้จากชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ของโปรแกรม test5.prg ที่อัตราขยาย 50 เท่า.....	54
3.12 แสดงใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งได้ตามโปรแกรม test5.prg ที่อัตราขยาย 50 เท่า.....	55
3.13 แสดงสเกลมาตรฐานใช้อ้างอิงที่ 50 เท่า โดยแต่ละเส้นห่างกัน 10 ไมโครเมตร.....	55
3.14 แสดงขนาดของปลายใยแก้วนำแสงที่ผ่านการติดตั้งแล้ว.....	55
3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้ความร้อนกับมุมมองของใยแก้วนำแสง (องศา).....	58
3.16 แสดงใยแก้วนำแสงตรงที่ผ่านการติดตั้งแล้ว a) ที่ความยาว 1.1 มิลลิเมตร.....	58
3.17 แสดงใยแก้วนำแสงตรงที่ผ่านการติดตั้งแล้ว b) ที่ความยาว 0.7 มิลลิเมตร.....	59
3.18 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดงอ 27 องศา.....	59
3.19 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดงอ 48 องศา.....	60
3.20 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดงอ 60 องศา.....	60
3.21 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดงอ 75 องศา.....	61
3.22 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดงอ 85 องศา.....	61
3.23 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดงอ 80 องศาแต่ปลายละลาย.....	62
3.24 แสดงฐานอลูมิเนียมขนาด $3.5 \times 1.5 \times 0.5$ มิลลิเมตร ³	64
3.25 แสดงการติดตั้งโพรบชนิดงอบนฐานอลูมิเนียม โดยมองจากด้านบน.....	65
3.26 แสดงการติดตั้งโพรบชนิดงอบนฐานอลูมิเนียม โดยมองจากด้านข้าง.....	65
3.27 แสดงโพรบชนิดงอติดตั้งบนฐานอลูมิเนียม หรือแคนทิลีเวอร์ด้วยการยึดด้วยกาว.....	66
3.28 ตัวอย่างตัวจับยึดที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส.....	67
3.29 แสดงการติดตั้งแคนทิลีเวอร์กับตัวยึดโพรบชนิดงอ.....	67
3.30 แสดงภาพถ่ายของแคนทิลีเวอร์กับตัวยึดโพรบชนิดงอ.....	68
3.31 แสดงหัวสแกนเนอร์ของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส.....	68

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่.....	หน้า
3.32 แสดงห้วงแกนนอร์ของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส เมื่อใส่ตัวยึดโพรบ ชนิดงอแล้ว.....	69
3.33 ไดอะแกรมของการกล้องจุลทรรศน์ในแบบทรานสมิสชันโหมด.....	70
3.34 แสดงแสงเลเซอร์ที่โฟกัสลงบนโพรบชนิดงอ.....	71
3.35 แสดงภาพถ่ายของเลเซอร์ที่โฟกัสลงบนโพรบชนิดงอ.....	72
3.36 แสดงโพรบชนิดงอกำลังเข้าใกล้ตัวอย่าง.....	72
4.1 แสดงตัวอย่างความถี่การของโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอ.....	74
4.2 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตร ขนาด 10 x 10 ตารางไมโครเมตร จากโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอ.....	75
4.3 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตร ขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตรจากโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอ.....	75
4.4 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตร ขนาด 3 x 3 ตารางไมโครเมตรจาก โพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอ.....	76
4.5 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตร ขนาด 2 x 2 ตารางไมโครเมตรจาก โพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอ.....	76
4.6 แสดงโพรบซิลิกอนมาตรฐาน.....	77
4.7 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตรขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตรจาก โพรบซิลิกอนมาตรฐาน.....	77
4.8 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตรขนาด 3 x 3 ตารางไมโครเมตรจาก โพรบซิลิกอนมาตรฐาน.....	78
4.9 แสดงภาพภูมิประเทศของโพลีเมอร์ 500 นาโนเมตรขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตร ที่ความสูง 200 นาโนเมตร.....	79
4.10 แสดงภาพภูมิประเทศของโพลีเมอร์ 500 นาโนเมตรขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตร ที่ความสูง 100 นาโนเมตร.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่.....	หน้า
4.11 แสดงภาพภูมิประเทศ (ซ้าย) และภาพเชิงแสง (ขวา) ของโพลีเมอร์ 500 นาโนเมตร ขนาด 10 x 10 ตารางไมโครเมตร จากโพรบไยแก้วนำแสงชนิดงอที่ความสูง 50 นาโนเมตร.....	81
4.12 แสดงภาพภูมิประเทศ (ซ้าย) และภาพเชิงแสง (ขวา) ของโพลีเมอร์ 500 นาโนเมตร ขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตร จากโพรบไยแก้วนำแสงชนิดงอที่ความสูง 50 นาโนเมตร.....	82



บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมา และวัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดจนวิธีการและขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ โดยจะกล่าวเป็นลำดับหัวข้อดังต่อไปนี้

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านแสงมีสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาเทคโนโลยี ซึ่งจะพบเห็นเทคโนโลยีนี้ได้โดยทั่วไป ในงานค้นคว้าวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ด้านการสื่อสาร ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม เครื่องมือเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน และมีการค้นคว้าวิจัยทางด้านแสงกันอย่างกว้างขวาง ดังจะเห็นได้จากการวิจัยและพัฒนาแสงเลเซอร์ การวิจัยและพัฒนาใยแก้วนำแสง และกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (Optical Microscope) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ทางแสงชิ้นแรกๆ ที่คนส่วนใหญ่ได้พบเห็น และยังคงมีใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีในปัจจุบัน มีการพัฒนาไปอย่างมาก เทคโนโลยีเดิมๆ อย่างกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงไม่สามารถตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้อีกต่อไป

งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำคุณสมบัติของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส (Atomic Force Microscope) [1] ซึ่งใช้กันอยู่ทั่วไปในด้านการวิเคราะห์พื้นผิว (Surface Analysis) ของตัวอย่าง ทั้งพื้นผิวของสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต ซึ่งให้ภาพที่มีลักษณะเป็นภาพภูมิประเทศ (Topography Image) มารวมกับเทคโนโลยีทางด้านเลเซอร์และใยแก้วนำแสง เพื่อทำการสร้างภาพเชิงแสง (Optical Image) ที่มีความละเอียดสูงกว่าภาพเชิงแสงที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงทุกๆ ไป

โดยปกติแล้วภาพเชิงแสงที่เกิดจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ ภาพที่เกิดจากการสะท้อน (Reflection Image) ซึ่งจะต้องอาศัยแสงสว่างไปตกกระทบที่วัตถุ หลังจากนั้นแสงที่สะท้อนจากวัตถุ จะเดินทางไปตกลงบนเรตินาของดวงตา จึงทำให้สามารถมองเห็นวัตถุนั้นๆ ได้ หรือภาพที่เกิดจากการที่แสงทะลุผ่านวัตถุ (Transmission Image) หลังจากนั้นแสงจะเดินทางไปตกลงบนเรตินาของดวงตา หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงก็คือ การขยายภาพของวัตถุที่มีขนาดเล็ก ที่ตาเราไม่สามารถมองเห็นได้ โดยอาศัยเลนส์ขยาย ซึ่งอย่างน้อยต้องมีเลนส์อยู่ 2 ตัวคือเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Len) กับเลนส์ใกล้ตา (Eyepiece) แต่ด้วยข้อจำกัดทางการเลี้ยวเบน (Diffraction Limited) ของคลื่นแสง ดังนั้นภาพ

เชิงแสงจากกล้องจุลทรรศน์ไม่สามารถมีความละเอียดได้มากกว่า ความยาวของคลื่นแสงที่ใช้มองเห็นด้วยสอง ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 200 นาโนเมตรเมื่อใช้แสงสีน้ำเงิน และในความเป็นจริงแล้ว ยังมีตัวแปรอื่นๆ ที่จะต้องนำมาพิจารณาเป็นข้อจำกัด เช่น ความคลาดที่เกิดขึ้นในเลนส์ (Aberration) และความชัดเจนของภาพ (Focus) จากหลักความจริงนี้เองจึงทำให้มนุษย์พยายามเอาชนะข้อจำกัดเดิมที่ใช้กันมา โดยการค้นคิดและทำการวิจัย เพื่อให้สามารถที่จะมองเห็นวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในปัจจุบันได้มีการใช้งานกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสกันอย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการวิจัยชั้นนำระดับชาติหลายแห่ง และความสามารถที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสทั้งในเรื่องความละเอียดและความง่ายในการใช้งาน ในราคาที่ถูกลง แต่ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสเป็นเพียงภาพภูมิประเทศ จึงไม่สามารถนำมาใช้ศึกษาเซลล์สิ่งมีชีวิต หรือตัวอย่างที่มีความโปร่งใสได้ และต่อมาได้มีการพัฒนากล้องจุลทรรศน์เชิงแสง ชนิดกวาดแบบ near-field (Near-field Scanning Optical Microscope, NSOM) [2,3] ขึ้น โดยการนำใยแก้วนำแสงที่ผ่านการดึงให้เป็นปลายแหลมแล้ว มาใช้เป็นโพรบ โดยดัดแปลงใช้ตัวกวาด (Scanner) ของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสมาทำหน้าที่กวาด (Scan) ปลายโพรบไปตามลักษณะภูมิประเทศของพื้นผิว แต่เนื่องจากการกวาดของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสจำเป็นต้องใช้แสงเลเซอร์สะท้อนบนหลังของโพรบที่มีลักษณะเป็นตัวแอล (L) เพื่อให้ตัวกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสสามารถรักษาระยะของโพรบกับพื้นผิวของวัตถุได้ ทำให้เกิดความลำบากในการใช้ปฏิบัติงานกับโพรบใยแก้วนำแสงแบบตรงเป็นอย่างมาก [4-6] แม้ว่าจะมีการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจจับด้วยแรงเฉือน (Shear Force Detection) [7,8] หรือการตรวจจับด้วยค่าความจุ (Capacitance Detection) [9,10] แต่ก็ยังคงต้องดัดแปลงบางส่วนของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส ในงานวิจัยฉบับนี้จึงเสนอวิธีการผลิตโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอขึ้น เพื่อสามารถนำไปใช้แทนโพรบของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสได้ทันที โดยไม่ต้องมีการดัดแปลง และสามารถให้ภาพเชิงแสงที่มีความละเอียดกว่าภาพเชิงแสงจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงทั่วไปอีกด้วย

1.3 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัย เริ่มจากการทำการศึกษาลักษณะและทฤษฎีของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส ใยแก้วนำแสง แสงเลเซอร์ การเคลือบผิวด้วยไอออนของทองคำ โดยได้นำคุณ

สมบัติเด่นของตัวควาดในกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสที่มีความละเอียดสูง ต่อจากนั้นจึงเป็นสร้างเครื่องดิงไยแก้วนำแสง ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในการดิงไยแก้วนำแสงให้มีปลายแหลม และใช้ในการงอไยแก้วนำแสงด้วยเครื่องกลที่ใช้ในการดิง โดยมีต้นกำลังเป็นสตีปิงมอเตอร์ และตัวควบคุมสตีปิงมอเตอร์ หลังจากนั้นจึงเป็นการทดลองดิงและงอไยแก้วนำแสง การเคลือบผิวด้วยทองคำ เพื่อปกป้องกันแสงเลเซอร์ไว้ภายใน การติดตั้งโพรงกับฐานอลูมิเนียม และการติดตั้งเข้ากับกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสแล้วจึงเป็นการทดลองกับตัวอย่างมาตรฐาน เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

เพื่อเป็นการขยายขีดความสามารถของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสที่ได้ภาพภูมิประเทศที่มีความละเอียดสูงอยู่แล้ว ให้สามารถได้ภาพเชิงแสง โดยที่ไม่ต้องดัดแปลงกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสเลย และยังเป็นภาพเชิงแสงที่มีความละเอียดสูงกว่าภาพจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงทั่วไป อีกด้วย อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนา เพื่อให้ได้ภาพเชิงแสงที่มีความละเอียดสูงแบบอื่นๆ ต่อไป

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานทางแสง

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีเบื้องต้นทางแสงของการเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction) ข้อจำกัดของการเลี้ยวเบน (Diffraction limited) ความคลาด (Aberration) ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบแสงที่มีเลนส์เป็นส่วนประกอบ และจะอธิบายถึงหลักการของใยแก้วนำแสง (Fiber optic) กล้องจุลทรรศน์ กล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส และกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field เพื่อใช้เป็นทฤษฎีในการอธิบายการทดลองในบทต่อไป

เมื่อพูดถึงแสง จะต้องมีแหล่งต้นตออยู่เสมอ ซึ่งอาจจะเป็น ดวงอาทิตย์ หลอดไฟ แล้วเป็นการเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงจากแหล่งกำเนิดแสง เมื่อผ่านวัตถุโปร่งใสก็จะมีหักเห และสะท้อนเมื่อกระทบกับผิววัตถุที่สะท้อนแสง ในความคิดของนิวตัน นิวตันบอกว่าแสงเป็นอนุภาคที่ส่งติดต่อกันออกมา คล้ายปืนกลที่ยิงติดต่อกัน เมื่ออนุภาคนี้เข้าสู่เลนส์ตา ทำให้เกิดความรู้สึกในการมองเห็นภาพต่างๆ และสามารถอธิบายกฎการสะท้อนและหักเหของแสงโดยใช้ทฤษฎีที่ว่าแสงเป็นอนุภาค

ในปี 1670 ฮอยเกนส์ (Christian Huygens) ได้แสดงให้เห็นว่า กฎการสะท้อนและการหักเหของแสง อาจอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีคลื่นแสง อีก 160 ปี ต่อมา ยังค์ (Young) พบว่าแสงสามารถเกิดการแทรกสอดทำให้สามารถวัดความยาวคลื่นของแสงได้ ต่อมาเฟรสเนล (Fresnel) ได้ทดลองให้เห็นว่าแสงเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และกริมาลดี (Grimaldi) พบว่าแสงสามารถเลี้ยวเบนได้ โดยใช้อธิบายด้วยทฤษฎีของคลื่นแสง

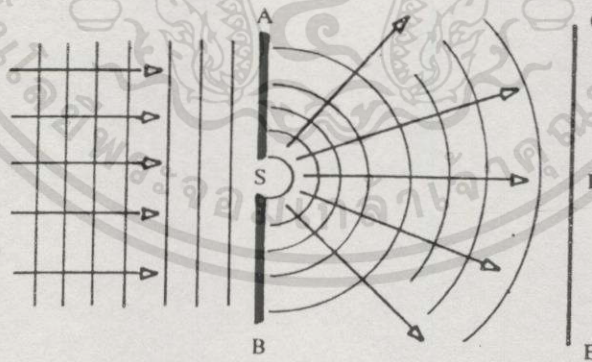
ต่อมาไอน์สไตน์ (Einstein) ได้เสนอทฤษฎีสัมพัทธภาพขึ้น ตามทฤษฎีดังกล่าวมวลจะขึ้นอยู่กับความเร็วของวัตถุเคลื่อนที่ และมวลกับพลังงานจะสมมูลกัน นอกจากนั้นยังมีทฤษฎีควอนตัมที่กล่าวถึงพลังงานที่เรียกว่า ควอนตัมของพลังงานหรือโฟตอน ซึ่งจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจะขึ้นอยู่กับความถี่หรือความยาวคลื่นของแสงนั้น คอมป์ตัน (Compton) ยังได้พบอีกว่าโฟตอนเหล่านี้ เมื่อชนกับอิเล็กตรอนแล้ว พลังงานและโมเมนตัมของโฟตอนจะเปลี่ยนไป ซึ่งเป็นคุณสมบัติของอนุภาคเมื่อมีการชนกัน ฉะนั้นแนวความคิดเกี่ยวกับแสงก็จะเป็นในลักษณะที่ว่าแสงจะมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค

2.1 การเลี้ยวเบน (Diffraction)

การเลี้ยวเบนเป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งของคลื่น การเลี้ยวเบนจะปรากฏให้เห็นเมื่อคลื่นถูกกีดขวาง สิ่งกีดขวางอาจเป็นฉากที่มีรูเปิดเล็ก ๆ หรือช่องแคบ (Slit) ที่จะปล่อยให้คลื่นผ่านไปหรือเป็นวัตถุขนาดเล็ก เช่น ลวดหรือแผ่นกลม ซึ่งกั้นคลื่นบางส่วนไม่ให้ผ่านไป

ถ้าคลื่นเป็นมีกลุ่มอนุภาควิ่งมาชนฉากที่มีรูเปิดเล็ก ๆ ส่วนที่อยู่ตรงกับรูเปิดก็จะผ่านไปได้และจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเดิมโดยไม่ถูกรบกวน ส่วนอื่นจะถูกกั้นเอาไว้ หรือถ้าเอาวัตถุมาขวางทางเดินของอนุภาค มันจะกั้นเฉพาะอนุภาคส่วนที่มาชนวัตถุ อนุภาคส่วนอื่น ๆ จะเคลื่อนที่ไปโดยไม่ถูกรบกวน อย่างไรก็ตามเราทราบจากประสบการณ์โดยเฉพาะในกรณีของคลื่นเสียงและคลื่นบนผิวน้ำว่า คลื่นสามารถกระจายไปรอบ ๆ สิ่งกีดขวางได้ ดังแสดงในรูป 2.1 ปรากฏการณ์นี้จะยิ่งเด่นชัดขึ้น เมื่อขนาดของช่องแคบหรือสิ่งกีดขวางมีค่าเข้าใกล้ความยาวของช่วงคลื่น

ในที่นี้เราจะกล่าวถึงการเลี้ยวเบนที่เกิดจากช่องเปิดหรือสิ่งกีดขวางที่มีรูปทรงแบบเรขาคณิตอย่างง่าย ๆ ในการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer) จะถือว่ารังสีตกเป็นรังสีขนาน และทำการสังเกตรั้วของการเลี้ยวเบนที่ระยะไกลพอที่จะถือว่ารังสีที่มาจากจุดสังเกตเป็นรังสีขนาน ในทางปฏิบัติอาจใช้เลนส์ช่วยรวมแสงที่เลี้ยวเบนไปในทิศเดียวกันให้มาตกที่เดียวกันบนจอ ส่วนการเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล (Fresnel) นั้นต้นกำเนิดแสงอาจอยู่ใกล้หรือทำการสังเกตที่ระยะใกล้ หรือทั้งสองอย่าง



รูปที่ 2.1 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่น

2.1.1 การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ที่ช่องแคบเดียว

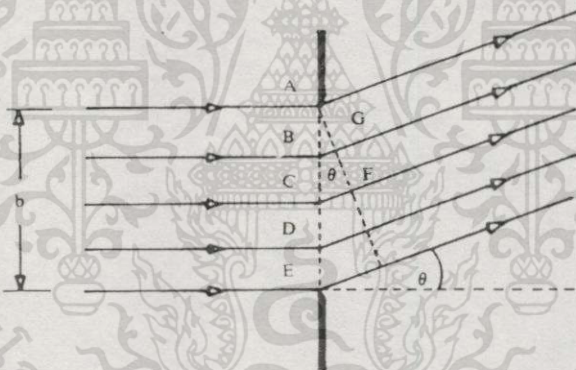
สมมติว่าช่องแคบที่แคบและยาวมากพอที่จะไม่ต้องคิดถึงผลที่เกิดจากปลายทั้งสองข้างได้ แสงที่ตกบนช่องแคบให้เป็นแสงขนานตกตั้งฉากระนาบของช่องแคบ การสมมติเช่นนี้จะ

ทำให้การคำนวณง่ายขึ้น เนื่องจากหลักของฮอยเกนส์ เมื่อแสงตกบนช่องแคบ ทุกๆ จุดบนระนาบของช่องแคบถือได้ว่าเป็นต้นแสงทุติยภูมิให้คลื่นใหม่ออกไปเรียกว่า คลื่นเลี้ยวเบน เมื่อสังเกตดูคลื่นเลี้ยวเบนที่มุม θ ต่าง ๆ กัน เทียบกับทิศทางของแสงตก รูป 2.2 เราจะเห็นว่า ในบางทิศทางความเข้มเป็นศูนย์ ทิศทางนี้ให้โดยสมการ 2.1

$$b \sin \theta = m \lambda \quad m \neq 0 \quad (2.1)$$

เมื่อ m เป็นเลขจำนวนเต็มมากกว่าศูนย์เพราะเป็นทิศทางของแสงตก ซึ่งเป็นทิศทางที่มีความเข้มสูงสุด b เป็นความกว้างของช่องแคบ λ เป็นความยาวคลื่นของแสง จากสมการการแทรกสอดแบบหักล้าง เมื่อทางเดินของสองรังสีแตกต่างกัน

$$(r_1 - r_2) = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 แสดงการเลี้ยวเบนของแสงขนานผ่านช่องแคบ

แล้วจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน จากรูป 2.2 ถ้ารังสีที่มาจากขอบ A กับรังสีที่มาจากจุดกึ่งกลาง C มีทางเดินแตกต่างกัน CF โดยที่

$$CF = \frac{1}{2} b \sin \theta = \frac{\lambda}{2} \quad (2.3)$$

หรือ

$$b \sin \theta = \lambda \quad (2.4)$$

แล้วรังสีคู่นี้จะแทรกสอดแบบหักล้าง ส่วนรังสีคู่อื่น ๆ ที่อยู่ห่างกัน $\frac{b}{2}$ ก็ จะแทรกสอดแบบหักล้างด้วยดังนั้น ในทิศทาง θ ก็จะไม่มีความสว่าง เมื่อมุม θ เพิ่มขึ้นเป็น θ' ซึ่งทำให้รังสีที่มาจาก A กับรังสีที่มาจาก B มีทางเดินแตกต่างกัน BG โดยที่

$$\begin{aligned} BG &= \frac{1}{4} b \sin \theta' \\ &= \frac{\lambda}{2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

หรือ

$$b \sin \theta' = 2\lambda \quad (2.6)$$

แล้วรังสีคู่นี้และคู่อื่น ๆ ที่อยู่ห่างกัน $\frac{b}{4}$ ก็ จะแทรกสอดแบบหักล้าง และให้ความเข้มศูนย์ ในทิศทาง θ' ในทำนองเดียวกัน ก็อาจแสดงให้เห็นได้ว่า ในทิศทาง θ''

$$b \sin \theta'' = 3\lambda \quad (2.7)$$

หรือ

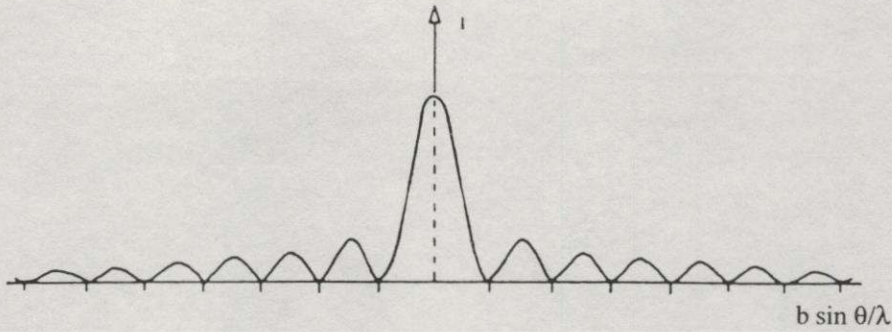
$$b \sin \theta''' = 4\lambda \quad (2.8)$$

ก็ให้ความเข้มศูนย์เหมือนกัน ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการทั่ว ๆ ไปได้ว่า

$$b \sin \theta = m\lambda \quad (2.9)$$

ซึ่งก็คือ สมการที่ 2.1 นั่นเอง โดยตำแหน่งมืดจะมีอยู่ทั้งสองข้างของแถบสว่างอันกลาง

ระหว่างตำแหน่งที่มีความเข้มศูนย์ตามสมการ 2.1 จะเป็นจุดที่มีความเข้มสูง แต่ความเข้มจะค่อย ๆ ลดน้อยลงไปเรื่อยๆ เมื่อออกห่างจากแถบสว่างอันกลางซึ่งผิดกับกรณีของการแทรกสอด ความเข้มของแสงเลี้ยวเบนเทียบกับมุม θ แสดงในรูป 2.3

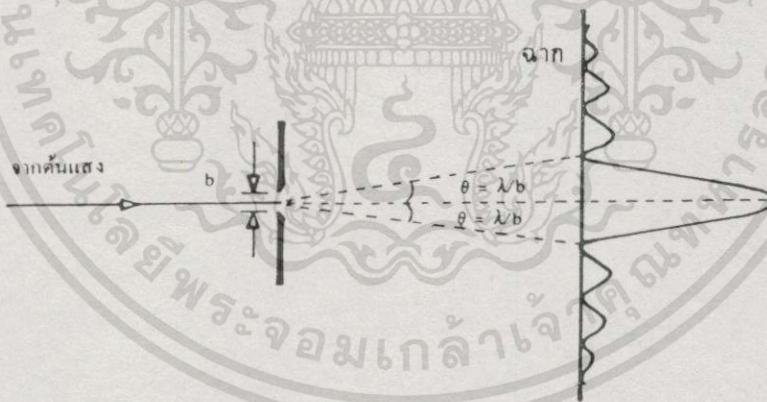


รูปที่ 2.3 ความเข้มของแสงเลี้ยวเบน

จะสังเกตได้ด้วยว่า ความเข้มสูงสุดแถบกลางมีความกว้างเป็นสองเท่าของแถบอื่น ๆ ตำแหน่งความเข้มศูนย์ครั้งแรกทั้งสองข้างของแถบสว่างอันกลางตรงกับมุม

$$\theta \approx \sin \theta = \pm \frac{\lambda}{b} \quad (2.10)$$

ซึ่งหาได้โดยแทนค่า $m = \pm 1$ ในสมการที่ 2.1 ดังรูป 2.4



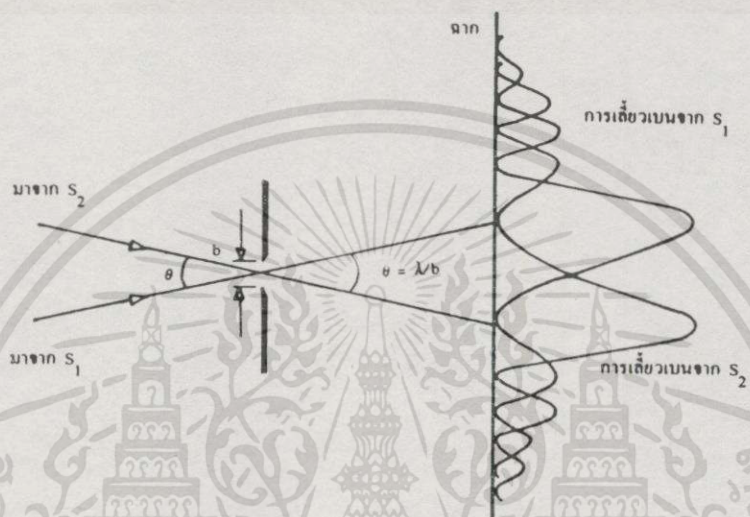
รูปที่ 2.4 มุมที่รองรับโดยแถบสว่างตรงกลางของการเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบ

หลักการที่น่าสนใจอย่างหนึ่ง คือ กำลังแยกของช่องแคบซึ่งกำหนดโดยนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อลอร์ดเรย์เลห์ (Lord Rayleigh) เขากำหนดให้เป็นมุมแคบที่สุดที่รองรับโดยคลื่นสองขบวนที่มาจากจุดกำเนิดแสงสองจุดที่อยู่ไกลมากและจากลวดลายการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) บอกได้ว่าแยกกัน เมื่อคลื่นมาจากที่ไกลสองจุด S_1 และ S_2 ผ่านช่องแคบในสองแนวทำมุม θ ระหว่างกัน รั้วการเลี้ยวเบนของคลื่นทั้งสองขบวนจะซ้อนกัน และจะเริ่มมองเห็นว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกกัน เมื่อแถบสว่างอันกลางของคลื่นหนึ่งทับกับแถบมืด แถบแรกของอีกคลื่นหนึ่ง ดังแสดง
ในรูป 2.5 ด้านขวามือถ้าพิจารณาจากสมการที่ 2.10 แล้ว มุม θ จะต้องเป็น

$$\theta = \frac{\lambda}{b} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.5 กำลังแยกของช่องแคบ

ซึ่งจะแสดงกำลังแยกของช่องแคบตามคำจำกัดความของเรย์เลห์ สมมติว่า S_1 และ S_2 เป็นจุดสองจุดในวัตถุที่อยู่ไกลมาก สมการที่ 2.11 จะให้ค่าของมุมแคบที่สุดระหว่างสองจุด ซึ่งเมื่อมองผ่านช่องแคบแล้วยังคงเห็นว่าเป็นสองจุด ถ้าให้แสงที่ผ่านช่องแคบมาตกบนจอ แล้วตรวจดูภาพนี้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ไม่ว่าจะใช้กำลังขยายมากเท่าไร ก็ไม่อาจมองเห็นรายละเอียดได้มากไปกว่าที่ให้โดยกำลังแยกของช่องแคบ ในการออกแบบทรนศนอุปกรณ์จึงต้องคำนึงถึงข้อนี้ด้วย

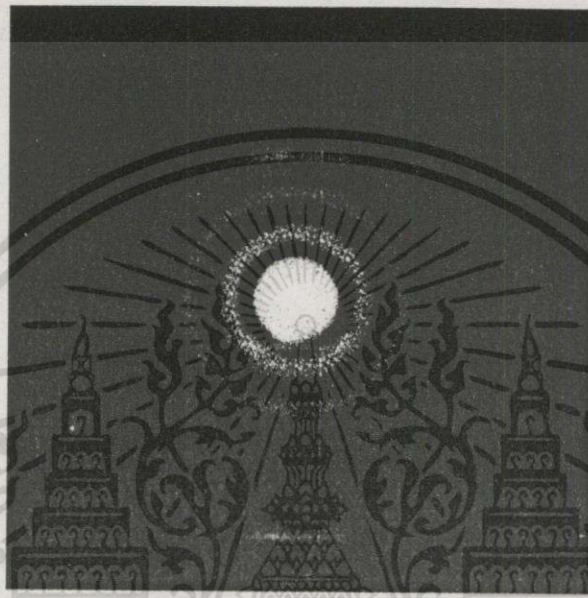
ถ้าช่องแคบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านกว้าง a ยาว b รั้วการเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นสองชุดในทางกว้างและทางยาว แทนที่จะเกิดเป็นแถบมืดสว่างสลับกัน จะได้รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียงกันเป็นดับ ทั้งในทางด้านกว้างและด้านยาว

2.2.2 การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ที่ช่องแคบกลม

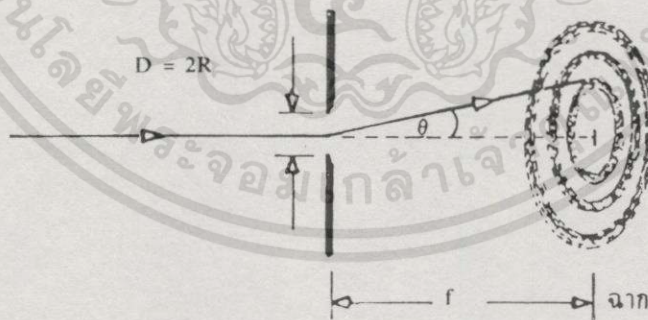
รั้วการเลี้ยวเบนที่เกิดจากช่องแคบกลมประกอบด้วยวงกลมสว่างล้อมรอบด้วยวงมืดและวงสว่างสลับกัน ดังแสดงในรูป 2.6 รั้วมีของดวงกลมตรงกลางและวงมืดสว่างที่ถัด ๆ

ไปมีความสัมพันธ์กันไม่สู้จะง่ายนัก การคำนวณค่อนข้างจะยุ่งยากกว่ากรณีของช่องแคบ จึงไม่ได้แสดงในที่นี้ ถ้า R เป็นรัศมีของช่องเปิด ดังรูป 2.7 มุมที่ตรงกับวงมืดวงแรกให้โดยสมการ

$$\sin \theta = \frac{1.22\lambda}{2R} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.6 ภาพลวดลายการเลี้ยวเบนจากช่องแคบกลม



รูปที่ 2.7 มุมที่รองรับโดยรั้วของการเลี้ยวเบนจากช่องแคบกลม

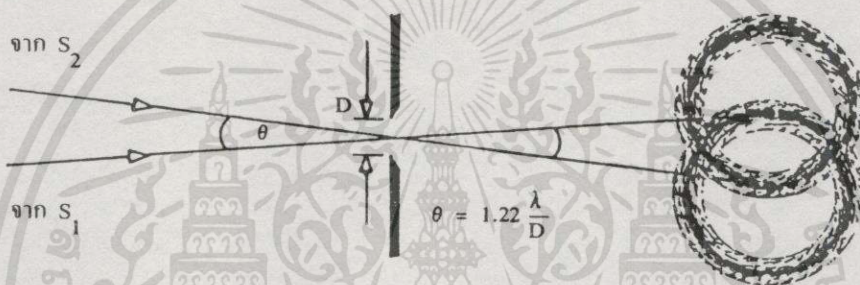
λ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ R อาจเขียนเป็น

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{2R} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1.22\lambda}{D} \quad (2.14)$$

เมื่อ D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องเปิด และ θ เป็นมุมรองรับที่รัศมีของดวงกลมสมการนี้บอกกำลังแยกของช่องเปิดกลมด้วยตามหลักของเรย์เลห์ ซึ่งจะกล่าวซ้ำอีกครั้งได้ว่าเป็นมุมเล็กที่สุดระหว่างคลื่นสองขบวนที่มาจากจุดกำเนิดสองจุดซึ่งอยู่ไกลมาก และให้รั้วการเลี้ยวเบนที่แยกกัน กรณีเช่นนี้เกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของดวงสว่างอันกลางจากไฟดวงหนึ่งไปทับกับวงมืดวงแรกที่เกิดจากดวงไฟอีกดวงหนึ่ง



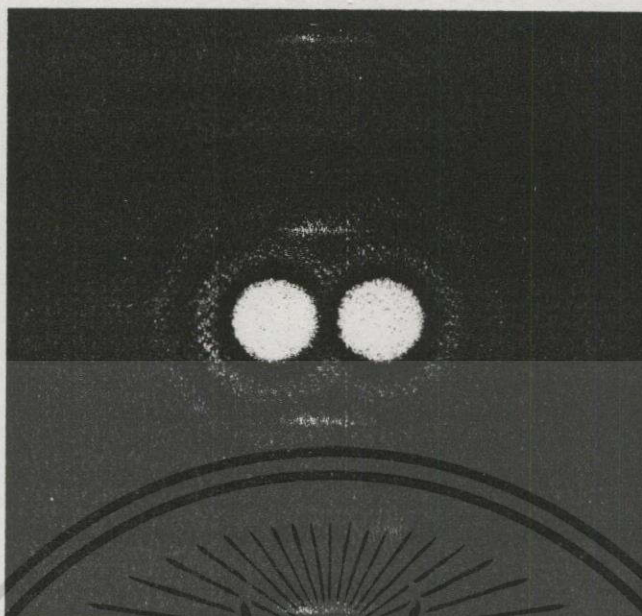
รูปที่ 2.8 กำลังแยกของช่องแคบกลม

มุมระหว่างดวงไฟสองดวงหาได้จากสมการที่ 2.14 เลนส์ใกล้วัตถุของกล้องโทรทรรศน์ก็เป็นช่องเปิดกลม ดังนั้น ภาพของวัตถุเป็นจุดที่อยู่ไกลก็เป็นรั้วการเลี้ยวเบนที่ช่องเปิดกลม แต่โดยปกติเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์โตมาก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของแสง รั้วการเลี้ยวเบนจึงเล็กมากจนอาจสังเกตเห็น

2.2 ข้อจำกัดของการเลี้ยวเบน (Diffraction limited)

ข้อจำกัดของการเลี้ยวเบนคือ ความสามารถของระบบออปติกในการจำแนกจุดสองจุดออกจากกัน เพราะว่าในช่องรูรับแสงแบบวงกลมแต่ละจุดก็จะเกิดวงรอบๆ ตัวมัน เพื่อให้ง่าย เราจะพิจารณาเฉพาะ Airy's Disk เท่านั้น

เมื่อช่องรูรับแสงมีขนาดใหญ่ จะเกิดการเลี้ยวเบนที่น้อย และ Airy's Disk มีขนาดเล็ก และง่ายในการที่จะบอกว่ารูปที่เกิดขึ้นมีจุด 2 จุด แต่ถ้าให้ช่องรูรับแสงมีขนาดเล็กลง การเลี้ยวเบนจะมีมากขึ้นและ Airy's Disk จะใหญ่ขึ้น และเริ่มที่จะทับกัน จนกระทั่งเหมือนกับว่าเป็นจุดเพียงจุดเดียว



รูปที่ 2.9 แสดง Airy's Disk ของจุดสองจุดที่อยู่ใกล้กันและยังสามารถแยกออกเป็น 2 จุด



รูปที่ 2.10 แสดง Airy's Disk ของจุดสองจุดที่ไม่สามารถแยกออกว่าเป็นจุด 2 จุด

ในระบบที่มีข้อจำกัดของการเลี้ยวเบน ช่องรับแสงที่ใหญ่ให้กำลังแยกที่สูงกว่า แต่กลับให้ค่าความคลาดที่สูง และในทางกลับกันช่องรับแสงที่เล็กจะให้ค่าความคลาดที่น้อย แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของการเลี้ยวเบน

สำหรับกล้องจุลทรรศน์ ถ้าให้ S คือระยะห่างน้อยที่สุดที่สามารถจำแนกจุด 2 จุดออกจากกันในระนาบของวัตถุ จากกฎของลอร์ดเรย์เลห์ ระยะทางที่น้อยที่สุดของจุด S ที่สามารถจำแนกได้เมื่อมีแหล่งกำเนิดเดี่ยวเท่ากับ

$$s = \frac{1.22\lambda}{2n \sin \alpha} \quad (2.15)$$

เมื่อให้ λ คือความยาวคลื่น 2α คือมุมของเลนส์ใกล้วัตถุที่ระนาบวัตถุ โดยเลนส์ใกล้วัตถุที่ระนาบวัตถุ และ n คือค่า index ของ object space (ปกติจะเป็นอากาศ ซึ่งมีค่าเป็น 1 แต่สามารถเป็นน้ำมันหรือตัวกลางอื่นได้) ในเทอมของ $n \sin \alpha$ เรียกกันว่าค่านัมเมอริคัลอเพอเจอร์ (Numerical Aperture) หรือ NA ซึ่งจะพิมพ์คู่กับค่าอัตราขยายอยู่ที่เลนส์ใกล้วัตถุ ในกล้องจุลทรรศน์ทุกตัว ในกล้องจุลทรรศน์ทั่วไป เลนส์ใกล้วัตถุจะมีค่า NA อยู่ในช่วง 0.08 ถึง 1.30 และในเลนส์พิเศษ ที่อาจสูงถึง 1.5 และเราสามารถลดรูปสมการลงอย่างง่าย ๆ ได้เป็น

$$s \approx \frac{\lambda}{2} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าในกล้องจุลทรรศน์ทั่วไป ความละเอียดสูงสุดโดยข้อจำกัดของการเลี้ยวเบนจะอยู่ที่ประมาณความยาวคลื่นหารสอง ซึ่งความยาวคลื่นในช่วงที่เรามองเห็นในช่วง 400 ถึง 700 นาโนเมตร ดังนั้นเราจำแนกจุดสองจุดออกจากกันด้วยความละเอียดสูงสุดประมาณ 200 นาโนเมตร ซึ่งที่ความละเอียดนี้ เรายังไม่ได้คิดเรื่องการโฟกัสและค่าความคลาด ซึ่งจะทำให้ความละเอียดนี้มีค่าลดลงในทางปฏิบัติอีกด้วย

ในระบบที่อยู่ในข้อจำกัดของการเลี้ยวเบน กำลังในการแยกขยายขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น คลื่นยาว (สีแดง) มีการเลี้ยวเบนมากที่สุด ขณะที่คลื่นสั้น (สีน้ำเงิน) มีการเลี้ยวเบนน้อยที่สุด นั้นเป็นเหตุผลว่าทำไมกล้องจุลทรรศน์แบบอุลตราไวโอเล็ต จึงมีความละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ทั่วไป และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ให้อัตราขยายที่สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบอุลตราไวโอเล็ต อย่างไรก็ตามการแพร่ของอนุภาคควอนตัมอันเนื่องมาจากการคลื่น ยังคงต้องพบอุปสรรคเกี่ยวกับข้อจำกัดในการเลี้ยวเบน

2.3 ความคลาด (Aberration)

ในการกล่าวถึงความบกพร่องของทัศนอุปกรณ์ที่ใช้งานมากก็มีเลนส์และกระจกซึ่งมีอยู่หลายชนิดเนื่องจากรูปร่างของมัน เลนส์ที่ใช้อาจมีขนาดโตขึ้น รั้งสีที่จะมาเกิดภาพก็มีมากขึ้น รั้งสีที่อยู่ห่างจากแกนและใกล้แกนก็จะไม่มาพบกันที่จุดเดียว ทำให้ภาพไม่ชัดเจนเท่าที่ควร ซึ่งเรียกว่า เกิดความคลาด หรือเนื่องจากตำแหน่งของวัตถุอยู่นอกแกนทำให้ได้ภาพที่ผิดเพี้ยนจากความเป็นจริงในลักษณะต่าง ๆ ความบกพร่องเหล่านี้จะได้พิจารณากันว่าภาพที่ได้รับผิดความจริงไปอย่างไรบ้างและจะแก้ไขให้ลดน้อยลงหรือหมดไปแต่ความบกพร่องบางประการก็ยอมให้มีได้โดยไม่ทำให้คุณภาพของภาพเลวจนเกินไปนัก ต่อไปนี้จะพิจารณาความคลาดในแบบต่าง ๆ ของเลนส์และกระจก

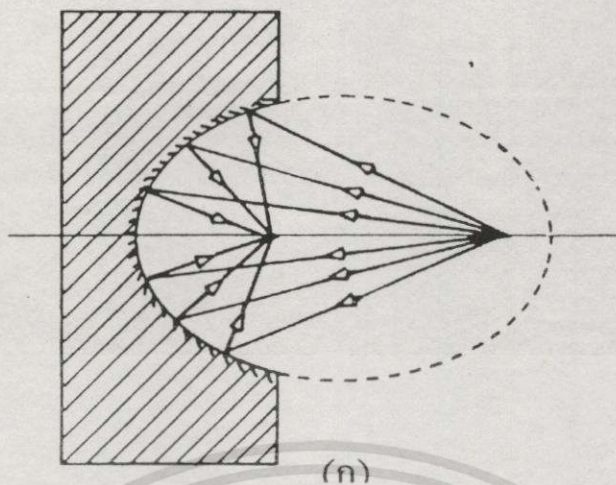
2.3.1 ความคลาดทรงกลม (Spherical aberration)

ความคลาดทรงกลม ของกระจกโค้ง เป็นข้อเสียที่ทำให้รั้งสีที่มาจากส่วนต่าง ๆ ของกระจกไม่พบกันที่จุดเดียว เนื่องจากแสงตกกระทบกระจกโค้งที่ส่วนต่าง ๆ ของกระจกรั้งสีที่ตกกระทบจะทำมุมไม่เท่ากัน ในกรณีเช่นนี้เมื่อนำฉากมารับภาพจะได้ภาพไม่ชัด เนื่องจากแสงไม่ได้สะท้อนมาตัดกันที่จุดเดียวกัน

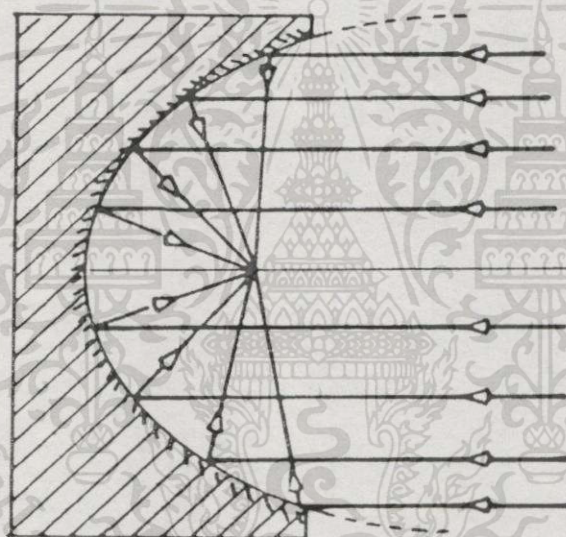


รูปที่ 2.11 ความคลาดทรงกลมของกระจกโค้ง

ความคลาดทรงกลมแก้ไขได้ยาก แต่อาจจะออกแบบรูปร่างความโค้งใหม่แก้ไขได้ ดังรูป 2.12 และ รูป 2.13 เพื่อให้แสงสะท้อนมาตัดกันที่จุดเดียว กระจกโค้งนี้ก็จะไม่มีความคลาด



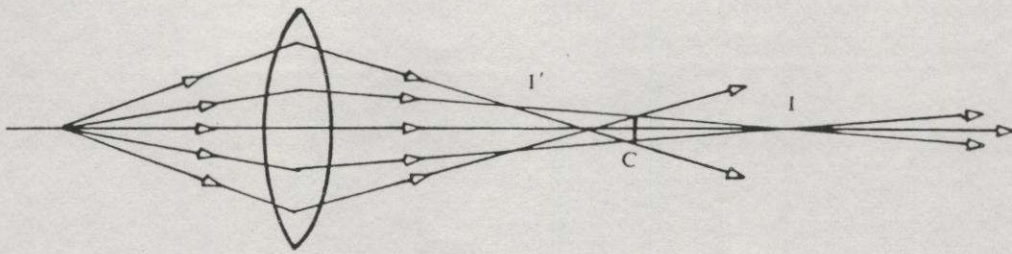
รูปที่ 2.12 กระจกโค้งรูปทรงรีที่ไม่มีความคลาดทรงกลม



รูปที่ 2.13 กระจกโค้งรูปพาราโบลาที่ไม่มีความคลาดทรงกลม

กระจกโค้งรูปพาราโบลาจะไม่มีความคลาด เมื่อแสงขนานกับแกนตกกระทบจะสะท้อนไปพบกันที่จุดเดียวกัน จึงใช้กระจกชนิดนี้ในกล้องโทรทรรศน์

ส่วนความคลาดทรงกลมของเลนส์ เป็นข้อเสียที่ทำให้รังสีที่มาจากส่วนต่างๆ ของเลนส์ไม่พบกันที่จุดเดียว ดังรูป 2.14

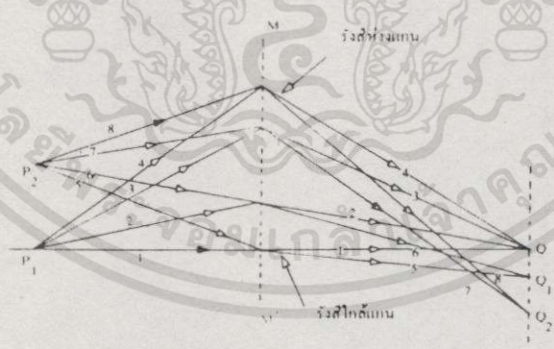


รูปที่ 2.14 ความคลาดทรงกลมของเลนส์

ถ้าเอากลมมารับภาพที่จุดที่ I และ I' จะได้ภาพเป็นจุดสว่างตรงกลางรอบๆ เป็นวงกลมขนาดต่างกันใน C วงกลมจะมีขนาดเล็กที่สุดเรียกว่า วงแห่งการสับสนน้อยที่สุด (Circle of least confusion) ถ้าเอากลมรับที่ตำแหน่งนี้จะได้ภาพที่ดีที่สุด ความคลาดทรงกลมของเลนส์อาจทำให้ลดน้อยลงโดยบังแสงที่ตกห่างแกนออกเสียบ้าง ให้แสงส่วนใหญ่ผ่านแถวกลางๆ เลนส์ แสงจะได้ไปพบกันที่จุดเดียว

2.3.2 โคมา (Coma)

โคมา เป็นความคลาดที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่นอกแกน แสงจากวัตถุที่อยู่นอกแกนจะหักเหผ่านเลนส์ด้วยมุมต่าง ๆ กัน และเลนส์ไม่อาจรวมแสงจากทุกส่วนของเลนส์ให้พบกันที่จุดเดียว ทำให้ภาพของวัตถุที่เป็นจุด ปรากฏเป็นฟุ้งคล้ายดาวหาง ดังแสดงในรูปที่ 2.15

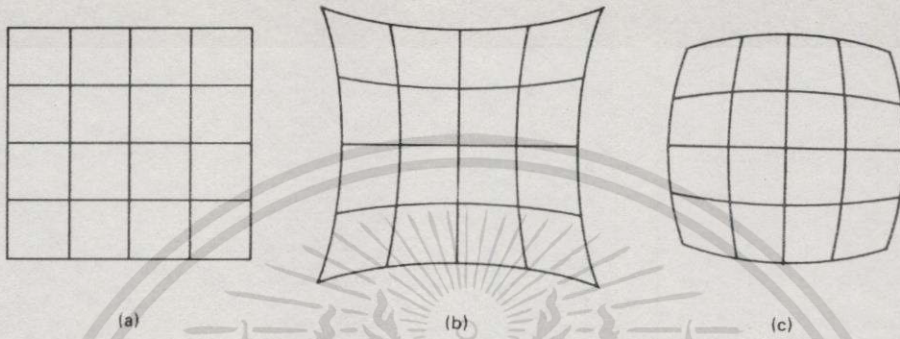


รูปที่ 2.15 แสดงการหักเหของรังสีต่าง ๆ จากวัตถุที่อยู่ทั้งที่แกนและนอกแกน

2.3.3 ความคลาดเพี้ยน (Distortion)

เมื่อวัตถุอยู่นอกแกน ทำให้การขยายของภาพที่อยู่ห่างจากแกนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความคลาดเพี้ยน ความคลาดชนิดนี้จะตรวจได้ง่ายโดยตรวจภาพของวัตถุที่ประกอบด้วยเส้นตรง เช่น รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่จะต้องแลเห็นเหลี่ยมมุมอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 2.16 จะเห็นภาพโค้ง

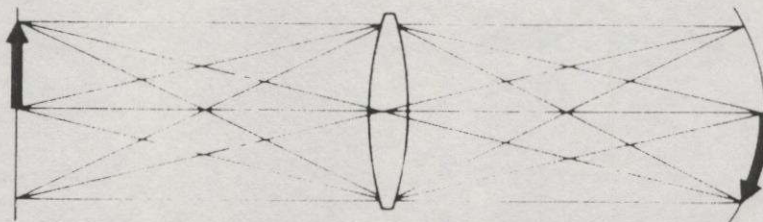
น้อย ๆ เนื่องจากกำลังขยายด้านความยาวไม่เท่ากัน แต่สำหรับวัตถุที่เป็นจุด ความคลาดเพี้ยนไม่มีผลมากนัก เพียงแต่ทำให้ตำแหน่งของภาพห่างจากแกนมากหรือน้อยไปกว่าที่ควรเท่านั้น ความคลาดเพี้ยนเล็กน้อยสำหรับทัศนอุปกรณ์ที่ใช้ดูด้วยตาไม่ทำให้เกิดผลเสียอะไร แต่ถ้าเป็นกล้องถ่ายภาพทางอากาศจะต้องเข้มงวดมาก เพราะภาพของเส้นตรงจะโค้งไม่ได้



รูปที่ 2.16 ความคลาดเพี้ยนของจอภาพ (a) ปกติ (b) โค้งเข้า และ (c) โค้งออก

2.3.4 ความคลาดโค้ง (Field curvature)

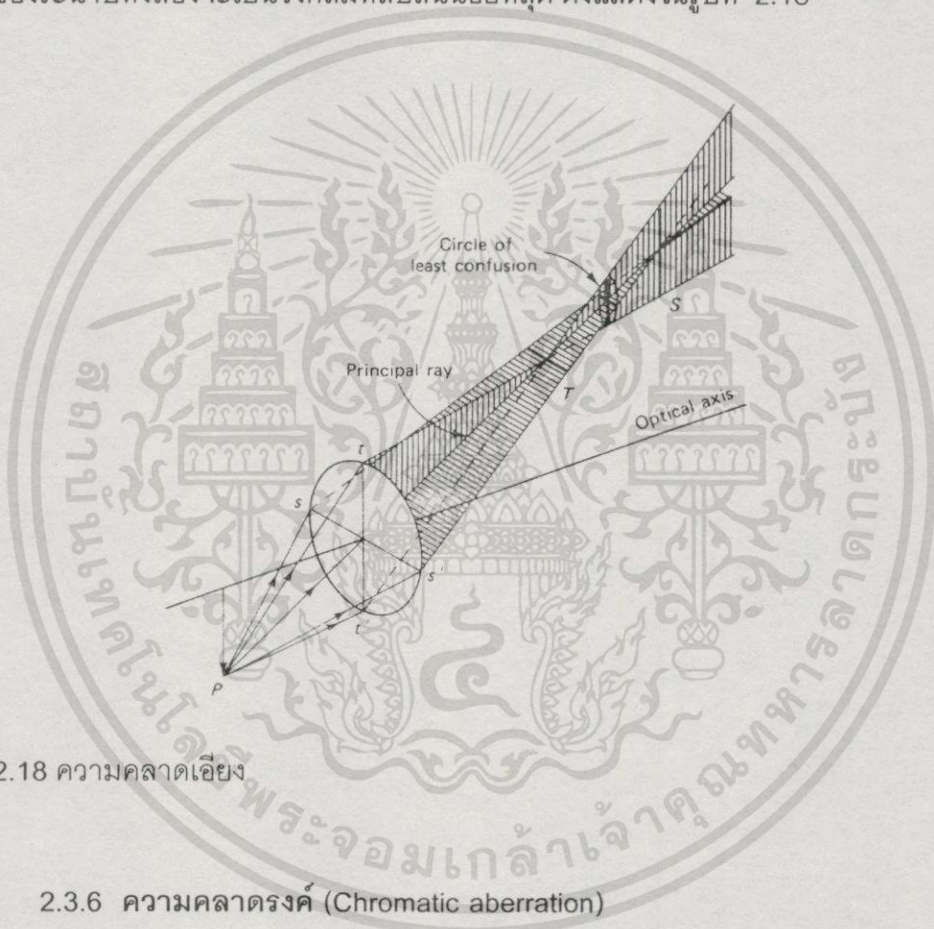
ความคลาดโค้ง เป็นความคลาดของเลนส์อีกอย่างหนึ่งที่ตรวจพบโดยง่าย เมื่อจุดรวมแสงเบี่ยงเบนไปจากระนาบที่ควรจะเป็น การพิจารณาภาพของวัตถุที่อยู่ในระยะใกล้และไม่ได้อยู่ในแนวระนาบ ภาพที่ชัดเจนจะแทนโดยส่วนโค้งของวงกลม ดังรูป 2.17 จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของภาพทั้ง 3 มิติเป็นรูปกระโถน ความโค้งถือเป็นบวก ถ้าด้านที่เว้าของกระโถนอยู่ทางด้านเลนส์ซึ่งเป็นกรณีของเลนส์นูน เมื่อเป็นเลนส์เว้าด้านที่นูนของภาพจะอยู่ใกล้เลนส์ ในกรณีนี้เรียกว่า ความโค้งเป็นลบ ตัวอย่างของความคลาดโค้งของภาพอาจจะสังเกตเห็นได้โดยง่ายโดยการฉายภาพนิ่งลงบนฉาก แม้ว่าจะเป็นเครื่องฉายชั้นดี ก็อาจจะสังเกตเห็นขอบของภาพไม่ชัดไปบ้าง แม้ว่าตรงจุดรวมแสงจะชัดเจนก็ตาม จุดรวมแสงจะอยู่ต่างระนาบกัน เมื่อเอาฉากบริเวณระหว่างกลางของจุดรวมแสงทั้งสองแห่งนี้ตรงเส้นประในรูป 2.17 จะได้ภาพชัดพอสมควร การแก้ไขความคลาดโค้งโดยการใส่เลนส์เว้าที่เหมาะสมประกอบกับเลนส์นูนก็จะได้ภาพที่ดีขึ้น



รูปที่ 2.17 ความคลาดโค้ง

2.3.5 ความคลาดเอียง (Astigmatism)

ความคลาดเอียง เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่นอกแกน ภาพที่เกิดจากวัตถุอาจมีจุดรวมแสงเป็นสองระนาบ รังสีที่มาจากระนาบนอนและระนาบตั้งไม่ตัดกันที่จุดเดียวกัน รังสีที่มาในระนาบนอนจะไปตัดกันที่จุดหนึ่ง และรังสีที่มาในระนาบตั้งจะไปตัดกันอีกจุดหนึ่ง ระยะระหว่างจุดตัดทั้งสองนี้เป็นค่าความต่างของจุดรวมแสงทั้งสองระนาบซึ่งแปรตามวัตถุที่อยู่นอกแกน และจะกลายเป็นศูนย์เมื่อวัตถุอยู่บนแนวแกนรังสีจากทั้งสองระนาบจะมาตัดกันที่จุดเดียวกัน ถ้าหากวัตถุไม่เป็นจุดภาพที่ได้จะมีรูปร่างไปคนละแนวแต่มีจุดรวมกันที่บนแกน ภาพที่อยู่ตรงกลางของระนาบทั้งสองจะเป็นวงกลมที่สับสนน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.18



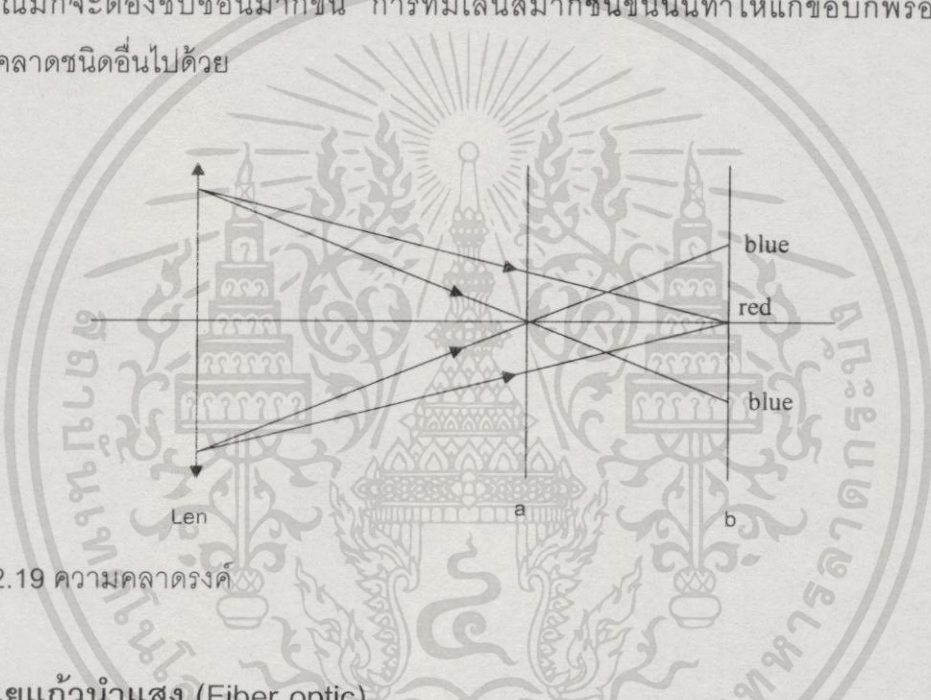
รูปที่ 2.18 ความคลาดเอียง

2.3.6 ความคลาดรงค์ (Chromatic aberration)

เมื่อใช้อุปกรณ์กับแสงขาวซึ่งประกอบด้วยความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน เมื่อแสงผ่านเลนส์ภาพที่รับได้จะมีขอบเป็นสีต่าง ๆ เนื่องจากเกิดความคลาดรงค์ เนื่องจากเลนส์นูนก็คล้ายกับปริซึมสองอันที่เอาฐานมาต่อกัน และเลนส์เว้าคล้ายเอายอดของปริซึมสองอันมาต่อกัน เมื่อเราให้แสงขาวส่องผ่านปริซึมจะเห็นว่าปริซึมแตกหรือแยกสเปกตรัมของสีของออกมา ฉะนั้นเลนส์จึงมีทางยาวโฟกัสเปลี่ยนตามความยาวคลื่น ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางจึงเปลี่ยนตามความยาวคลื่น ทางยาวโฟกัสของเลนส์จะสั้นกว่าสำหรับแสงคลื่นสั้น และยาวกว่าสำหรับแสงคลื่นยาว ภาพของวัตถุที่เป็นจุดจะเป็นจุดสีต่าง ๆ เรียงกันไปบนแกน สำหรับวัตถุที่มีขนาดจะ

ได้ภาพขนาดจะได้ภาพขนาดต่าง ๆ กันสำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ถ้านำจากไปรับภาพที่จุด a ก็จะได้ภาพที่สีน้ำเงินโฟกัสอยู่บนฉากพอดี แต่จะเป็นวงสีแดงและในทางกลับกัน เมื่อนำจากไปรับภาพที่ b ก็จะได้ภาพที่สีแดงโฟกัสอยู่บนฉากพอดี แต่จะเป็นวงน้ำเงิน

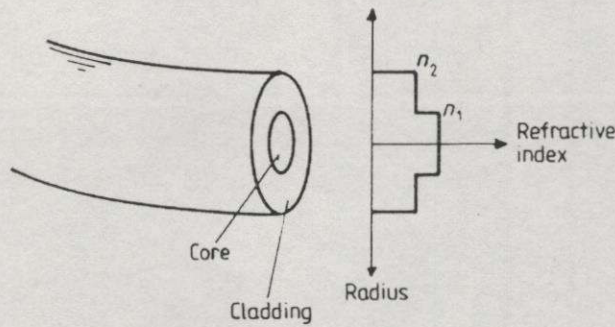
การแก้ไขความคลาดตรงค์อาจแก้ไขได้โดยการใช้เลนส์หลายชิ้นและทำด้วยแก้วที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกันมาประกบกันเข้าด้วยกัน โดยความคลาดของเลนส์อันหนึ่งจะไปหักล้างความคลาดของเลนส์อีกอันหนึ่ง เพราะเลนส์มีรูปร่างที่ต่างกันและมีกำลังกระจายที่ต่างกันอีกด้วย เลนส์ชนิดนี้เรียกว่า เลนส์อรงค์ (Achromatic lens) เลนส์ที่มีคุณภาพดีที่ใช้เป็นทัศนอุปกรณ์มักจะต้องซับซ้อนมากขึ้น การที่มีเลนส์มากขึ้นนั้นทำให้แก้ไขข้อบกพร่องจากความคลาดชนิดอื่นไปด้วย



รูปที่ 2.19 ความคลาดตรงค์

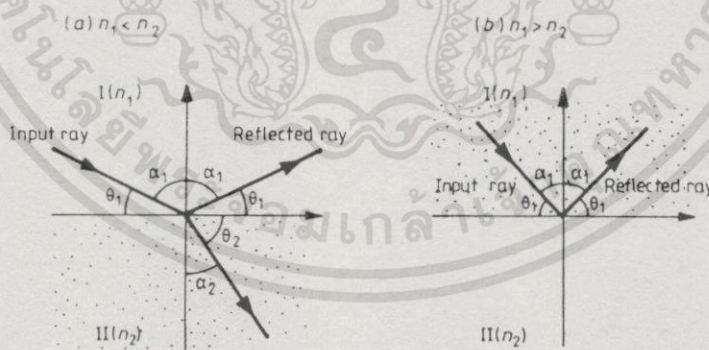
2.4 ใยแก้วนำแสง (Fiber optic)

หน้าที่ของใยแก้วนำแสงก็คือการจำกัดขอบเขตทางเดินของแสงไว้ภายในท่อแก้วที่ยาว ในรูปแบบที่ง่าย ๆ ใยแก้วนำแสงจะมีลักษณะเป็นท่อนำคลื่นที่ทำจากท่อทรงกระบอก 2 ชั้น โดยทรงกระบอกตรงกลาง (Core, n_1) มีค่าการหักเหของแสง (Refractive index) ที่ต่างจากทรงกระบอกชั้นนอก (Cladding, n_2) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 การจำกัดขอบเขตของแสงให้เดินทางไปในท่อนำคลื่นนั้น เป็นการแพร่ของคลื่นตามความยาวของใยแก้วนำแสง ตามหลักการของการสะท้อนกลับหมดภายใน (Total internal reflection, TIR)



รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของใยแก้วนำแสง

เมื่อแสงเดินทางจากวัสดุที่มีดัชนีการหักเหของแสงสูงกว่าไปยังวัสดุที่มีดัชนีการหักเหที่ต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (a) ส่วนของแสงที่ตกกระทบส่วนหนึ่งจะถูกหักเหและอีกส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนที่รอยต่อ เนื่องจากว่า α_1 จะต้องโตกว่า α_2 จึงเป็นไปได้ที่จะทำให้ α_1 มีขนาดโตพอที่จะทำให้ $\alpha_2 = 90^\circ$ ค่า α_1 นี้เรียกว่ามุมวิกฤต (Critical angle) สำหรับ α_1 ที่โตกว่านี้จะไม่มีการหักเห แสงจะถูกสะท้อนกลับหมดภายใน ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (b) โดยมุมของการหักเหเป็นไปตามสมการที่ 2.17 ฉะนั้นเมื่อแสงตกทำมุมวิกฤต แสงที่ผ่านไปยังตัวกลางที่มีดัชนีการหักเหของแสงน้อยกว่า จะทำมุม 90 องศา หรือหักเหขนานไปกับผิว และเมื่อแสงตกกระทบทำมุมโตยิ่งขึ้น ก็จะไม่มีการเดินทางไปยังตัวกลางที่โปร่งกว่าคือ จะเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในตัวกลางนั้น



รูปที่ 2.21 การหักเหและการสะท้อนของแสง กรณี (a) $n_1 < n_2$ และกรณี (b) $n_1 > n_2$

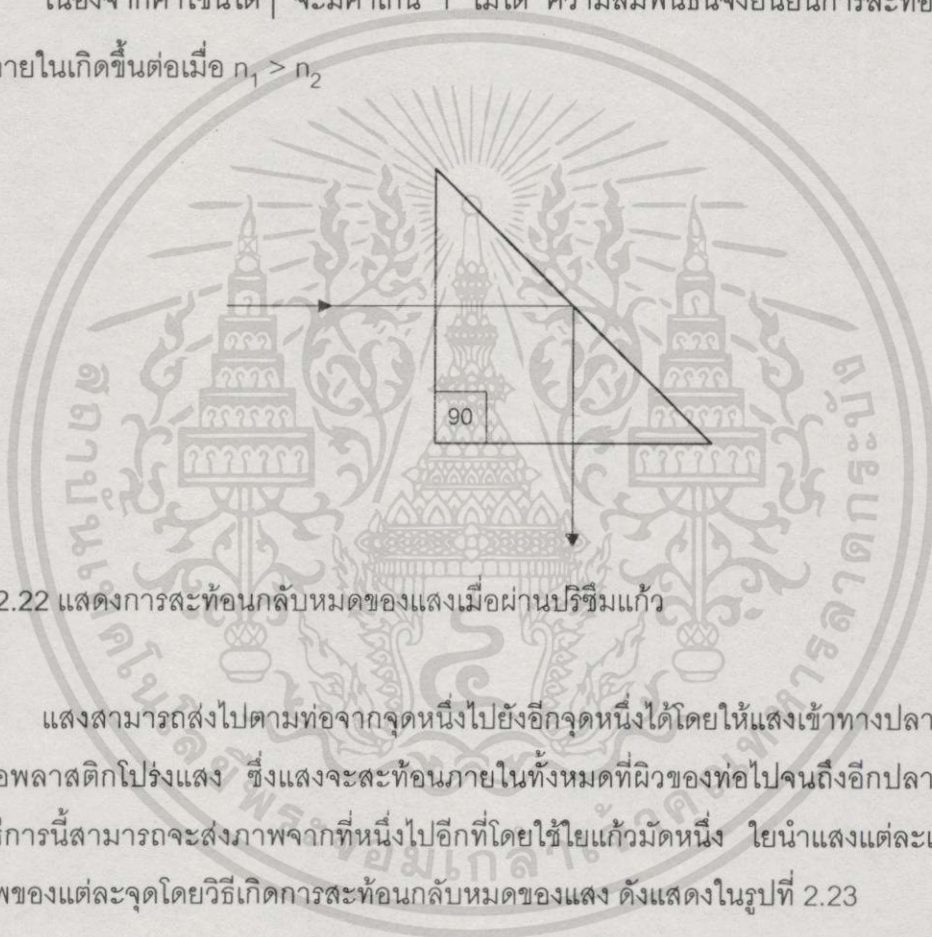
พิจารณารูปที่ 2.21 มุมวิกฤตของแสงตกในแก้ว ($n_1=1.5$) ออกสู่อากาศให้ $\alpha_2 = 90$ องศา เมื่อใช้กฎของสเนลก็จะหาค่ามุมวิกฤตของแสงตกในแก้วได้ โดยมีข้อสังเกตคือการสะท้อนกลับหมดภายในจะเกิดขึ้นเมื่อ α_1 จะต้องโตกว่า α_2 ซึ่งหาได้จากสมการ 2.17

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (2.17)$$

$$\alpha_1 = 42^\circ \quad (2.18)$$

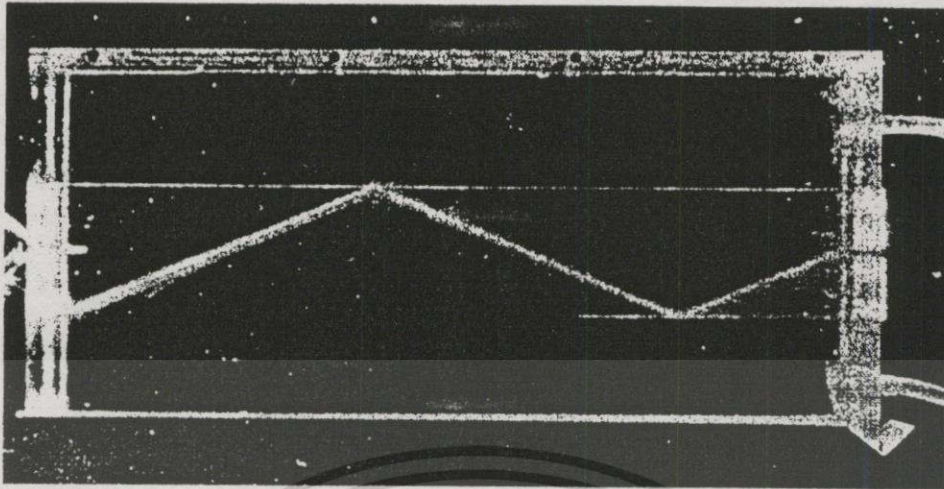
มุมวิกฤตของแก้วในอากาศจึงน้อยกว่า 45 องศา ถ้าแสงตกกระทบปริซึมแก้วในลักษณะดังรูป 2.22 จะเกิดการสะท้อนกลับหมดของแสง

เนื่องจากค่าไซน์ใด ๆ จะมีค่าเกิน 1 ไม่ได้ ความสัมพันธ์นี้จึงยืนยันการสะท้อนกลับหมดภายในเกิดขึ้นต่อเมื่อ $n_1 > n_2$



รูปที่ 2.22 แสดงการสะท้อนกลับหมดของแสงเมื่อผ่านปริซึมแก้ว

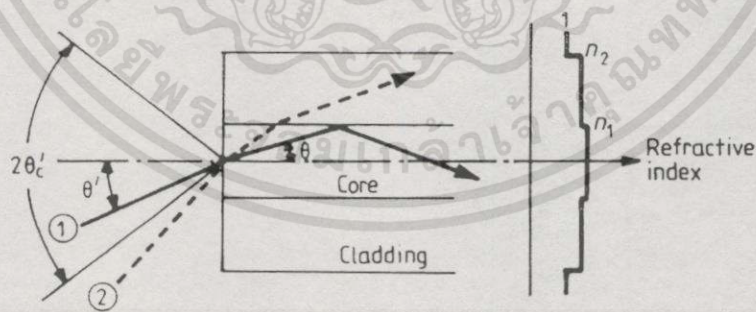
แสงสามารถส่งไปตามท่อจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้โดยให้แสงเข้าทางปลายหนึ่งของท่อพลาสติกโปร่งแสง ซึ่งแสงจะสะท้อนภายในทั้งหมดที่ผิวของท่อไปจนถึงอีกปลายหนึ่ง โดยวิธีการนี้สามารถจะส่งภาพจากที่หนึ่งไปอีกที่โดยใช้ใยแก้วมัดหนึ่ง ใยนำแสงแต่ละเส้นจะส่งภาพของแต่ละจุดโดยวิธีเกิดการสะท้อนกลับหมดของแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงการแพร่กระจายของแสงในใยแก้วนำแสง

แสงจะเดินทางไปในใยแก้วนำแสงด้วยการทำให้ดรรชนีหักเหแสงของแกนกลาง (Core, n_1) มีค่ามากกว่าเปลือกหุ้ม (Cladding, n_2) จากรูปที่ 2.23 เมื่อมีรังสี 1 ลำพุ่งเข้าไปในใยแก้วนำแสงด้วยมุม θ' และด้วยดรรชนีหักเหของอากาศที่มีค่าเท่ากับ 1 มุมของแสงที่วิ่งผ่านเข้าไปในใยแก้วนำแสงเปลี่ยนเป็น θ จากสมการ 2.19

$$\frac{\sin \theta'}{\sin \theta} = n_1 \tag{2.19}$$



รูปที่ 2.24 แสดงแสงที่วิ่งเข้าไปในใยแก้วนำแสง

โดยมุม θ มีต้องมามีค่ามากกว่ามุมวิกฤต และในทางปฏิบัติค่าของ $n_1 - n_2 \ll n_1$ ดังนั้นค่าความต่างระหว่างดรรชนีหักเห Δ เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (2.20)$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.21)$$

ค่า Δ จะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ และมุมของการสะท้อนกลับหมดภายในของใยแก้วนำแสงสามารถเขียนในรูปของ Δ ได้ดังนี้

$$\theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.22)$$

$$= \cos^{-1}(1 - \Delta) \quad (2.23)$$

$$= 2 \sin^{-1} \sqrt{\frac{\Delta}{2}} \quad (2.24)$$

$$\approx \sqrt{2\Delta} \quad (2.25)$$

ถ้าให้ $\Delta = 1\%$ มุมวิกฤตเพื่อให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายในจะเท่ากับ 8 องศา และมุมที่ยอมรับได้สูงสุด ตามรูปที่ 2.23 ซึ่งเท่ากับ $2\theta_c'$ และเนื่องจาก $\theta_c' = \sin^{-1}(n_1 \sin \theta_c)$ ดังนั้น

$$2\theta_c' = 2 \sin^{-1}(n_1 \sin \theta_c) \quad (2.26)$$

$$\approx 2 \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.27)$$

และค่า NA (Numerical aperture) จะเท่ากับ

$$NA = \sin \theta_c' \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

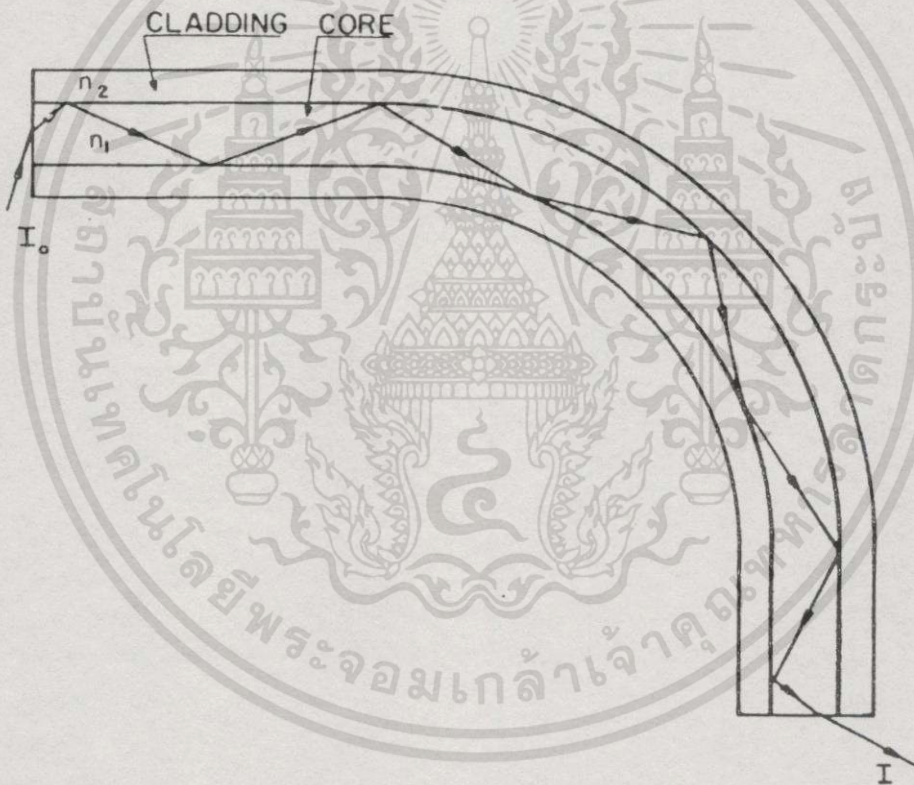
$$= n_1 \sin \theta_c \quad (2.29)$$

$$= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.30)$$

$$\approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.31)$$

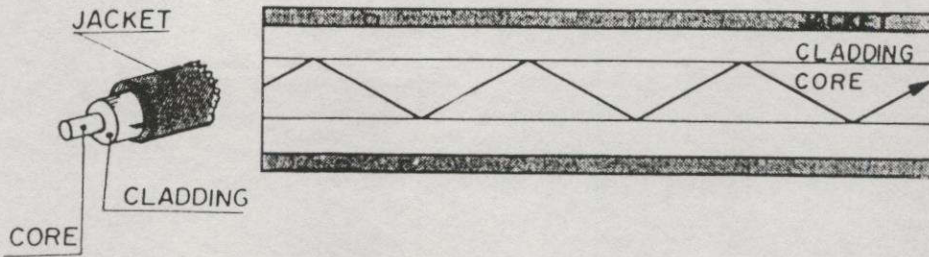
ถ้าให้ $\Delta = 1\%$ และ n_1 เท่ากับ 1.5 จะได้ค่า NA เท่ากับ 0.21 และมุม $2\theta_c'$ เท่ากับ 24 องศา

ตัวแปรต่างๆ เช่นค่าความต่างระหว่างดรรชนีหักเห Δ มุมที่ยอมรับได้สูงสุด $2\theta_c'$ และค่า NA เป็นค่าพารามิเตอร์พื้นฐานในการอธิบายคุณลักษณะของใยแก้วนำแสง



รูปที่ 2.25 แสดงการเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในของท่อนำแสงโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงโครงสร้างของใยแก้วนำแสงที่ประกอบไปด้วย Core, Cladding และ Jacket

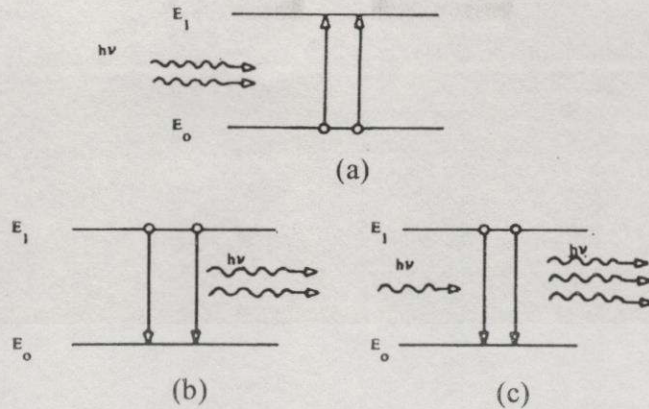
2.5 เลเซอร์

เลเซอร์ มาจากคำภาษาอังกฤษ LASER เป็นคำที่เกิดจากการเอาอักษรตัวหน้าของ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation มารวมกัน เลเซอร์ จึงหมายถึง การขยายแสงโดยการกระตุ้นให้ปล่อยรังสีออกมา แสงเลเซอร์เป็นแสงที่มีความเข้มและพลังงานสูงมากมีความกว้างของลำแสงแคบมาก สามารถจะรวมลำแสงส่องมายังจุดเดียวกันได้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้มากมาย

แสงจากต้นกำเนิดธรรมดาที่เปล่งออกมา เช่น จากดวงไฟจะกระจายออกมารอบ ๆ มีหลายสีหรือหลายความถี่รวมกัน แต่แสงเลเซอร์ไม่เหมือนแสงอื่น เพราะแสงเลเซอร์เมื่อออกมาจากต้นกำเนิดไปในทิศทางเดียวกันหมด และมีความถี่เดียวมีเฟสเดียวกัน แสงเลเซอร์จึงเป็นแสงอาพันธ์ (Coherent Light)

เพื่อทำความเข้าใจในหลักการของเลเซอร์ให้พิจารณารูป 2.27 ในรูป 2.27 (a). อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานต่ำได้รับพลังงาน $h\nu$ ที่พอเหมาะจากภายนอกจึงดูดกลืนพลังงาน แล้วขึ้นไปอยู่ในสถานะตื่นตัว รูป 2.27 (b). อิเล็กตรอนในสถานะตื่นตัวคืนสู่สถานะปกติ โดยแผ่รังสีออกมาเองตามปกติ (Spontaneous Emission) ให้โฟตอนออกมารอบทิศ

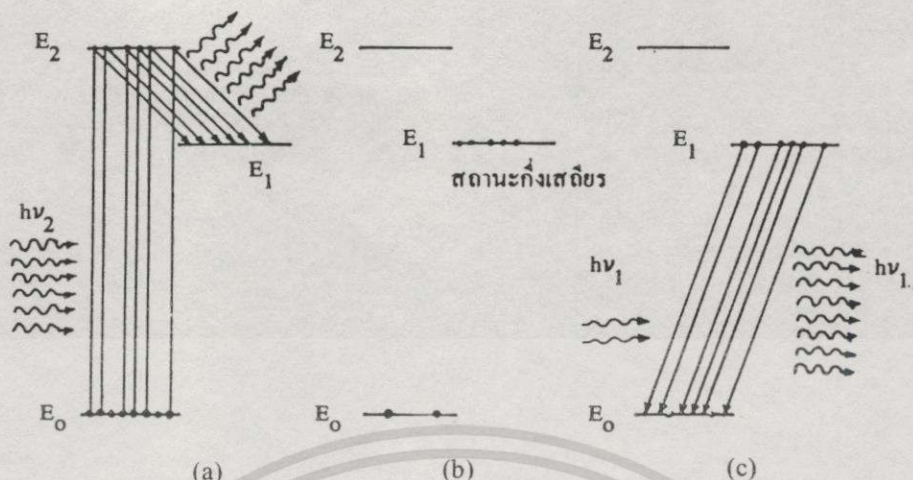
ในรูป 2.27 (c) ตอนเริ่มแรกอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะตื่นตัว ต่อมาใส่โฟตอนพลังงาน $h\nu$ ที่พอเหมาะจากภายนอกเข้าไป อะตอมในสถานะตื่นตัวถูกกระตุ้นให้แผ่รังสี (Stimulated Emission) พลังงาน $h\nu$ ออกมาทันทีในทิศทางเดียวกับโฟตอนที่มากระตุ้นโฟตอนทั้งสามมีความถี่เดียวกัน ทิศทางเดียวกัน เฟสตรงกันเป็นคลื่นอาพันธ์



รูปที่ 2.27 (a) การดูดกลืนรังสี (b) การแผ่รังสีเองตามปกติ (c) การแผ่รังสีโดยการกระตุ้น

ในภาวะปกติอะตอมจะมีอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะพลังงานต่ำสุดมากกว่าสถานะพลังงานสูง ดังนั้นเมื่อใส่โฟตอนพลังงานพอเหมาะเข้าไป ปรากฏการณ์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจึงเป็นดูดกลืนพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในสถานะพลังงานสูงมากกว่าที่จะเป็นการกระตุ้นให้แผ่รังสี การกระตุ้นให้แผ่รังสีจะเกิดขึ้นมากกว่าการดูดกลืนรังสีก็ต่อเมื่อ ในตอนแรกอิเล็กตรอนจะต้องอยู่ในระดับพลังงานสูงมากกว่าในระดับพลังงานต่ำอย่างไรก็ตามมีสารบางอย่างที่ระดับพลังงานเหมาะที่จะก่อให้เกิดการกระตุ้นให้แผ่รังสีได้ รูป 2.28 แสดงระดับพลังงานของสารดังกล่าว

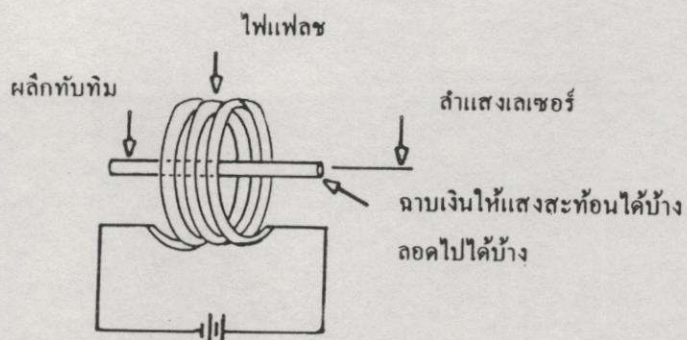
เมื่อฉายแสงความถี่พอเหมาะ $\nu_2 = \frac{E_1 - E_0}{h}$ จากภายนอกเข้าไปอะตอมจะดูดกลืนพลังงานทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนจากระดับ E_0 ไปอยู่ที่ E_2 อิเล็กตรอนจะอยู่ที่ E_2 ได้ประมาณ 10^{-8} วินาที ก็จะคายพลังงานออกเพื่อกลับคืนสู่ระดับ E_0 และ E_1 ทันที เนื่องจากระดับ E_1 เป็นระดับกึ่งเสถียร (Metastable) อิเล็กตรอนจะอยู่ในระดับนี้ได้ยาวนานกว่าสถานะต้นตัวทั่วไป คือประมาณ 1 วินาที แล้วจึงคืนสู่ระดับ E_0 ดังนั้นถ้าใช้แสงจากภายนอกสูบ (Pump) อิเล็กตรอนอย่างรวดเร็ว อิเล็กตรอนจากระดับ E_0 จะไปออกันอยู่ที่ระดับ E_1 ถ้ามีแสงความถี่ $\nu_1 = \frac{E_1 - E_0}{h}$ เข้ามาโฟตอนนี้จะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่ E_1 ให้กลับคืนสู่ E_0 ทันที พร้อมๆ กัน ในที่สุดได้โฟตอนเป็นจำนวนมากในทิศทางเดียวกับโฟตอนที่มากกระตุ้นเกิดเป็นแสงเลเซอร์ขึ้นวิธีการกระตุ้นให้แผ่รังสีนับเป็นหลักการสำคัญที่ใช้ในการผลิตแสงเลเซอร์



รูปที่ 2.28 ระดับพลังงานของสารที่เหมาะสมเป็นต้นกำเนิดแสงเลเซอร์ (a) อิเล็กตรอนจาก E_0 ไป E_1 , (b) อิเล็กตรอนไปอยู่ที่ E_2 , (c) อิเล็กตรอนที่ E_1 ถูกกระตุ้นให้แผ่รังสี

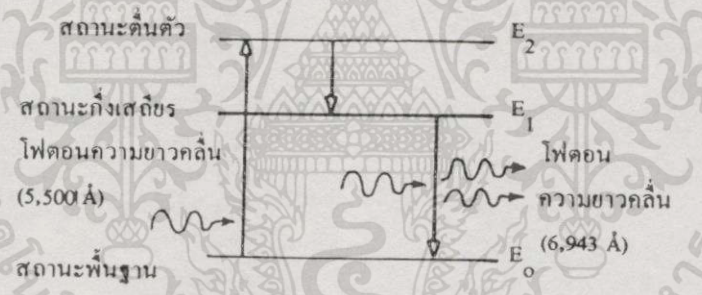
ปัจจุบันเราสามารถผลิตเลเซอร์ได้จากวัสดุหลายชนิด จากของแข็ง เช่นทับทิม แก้ว ของเหลวก็มีพวกไนโตรเบนซีน จากแก๊สต่าง ๆ เช่น ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์เครื่องแรกสร้างขึ้นในปี 1960 โดยเมนแมน (T.H. Mainman) นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันโดยใช้ผลึกทับทิม (Ruby Crystal) ซึ่งมีอลูมิเนียมออกไซด์และอะตอมของโครเมียมปนอยู่ด้วย เมนแมนได้ทำผลึกทับทิมให้เป็นแท่ง แล้วขัดปลายทั้งสองข้างให้เรียบและขนานกัน ด้านหนึ่งฉาบด้วยเงินให้เป็นกระจกเงาสะท้อนแสงได้เต็มที่ อีกด้านหนึ่งฉาบไว้เพียงเล็กน้อยเพื่อให้สะท้อนแสงและขณะเดียวกันให้เลเซอร์ทะลุไปได้รอบ ๆ แท่งทับทิม มีหลอดไฟแฟลช (Flash Lamp) พันโดยรอบดังรูป 2.29 ระดับพลังงานของอะตอมโครเมียม ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ แสดงไว้ในรูป 2.30

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป หลอดไฟแฟลชจะลุกสว่างวาบขึ้น อะตอมของโครเมียมจะดูดพลังงานของแสง ทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ที่ระดับ E_2 แล้วคายพลังงานส่วนหนึ่งมาอยู่ที่ E_1 แล้วจึงคายพลังงานที่เหลือลงสู่สถานะพลังงานต่ำสุด E_0 ให้แสงสีแดงความยาวคลื่น 6943 อังสตรอมออกมา โฟตอนความยาวคลื่น 694.3 นาโนเมตรนี้จะสะท้อนกลับไปกลับมา ระหว่างกระจกเงา แล้วไปกระตุ้นอะตอมโครเมียมที่ยังอยู่ในระดับ E_1 ให้ปล่อยโฟตอนต่อไปอีก ได้โฟตอนความยาวคลื่น 6943 อังสตรอมเป็นจำนวนมาก แสงที่สะท้อนกลับไปมาหลาย ๆ ครั้งเมื่อปล่อยออกมาทางด้านที่ฉาบเงินไว้เพียงเล็กน้อย จะเป็นแสงเลเซอร์ที่มีเฟสเดียวกันหมด เป็นลำแสงขนานที่มีความเข้มสูงมาก



รูปที่ 2.29 การผลิตเลเซอร์จากผลึกทับทิม

เนื่องจากแสงจากเครื่องกำเนิดเลเซอร์มีความเข้มสูง เมื่อโฟกัสให้ไปรวมกันเป็นจุดเล็ก ๆ จะเป็นแสงที่มีกำลังหลายล้านวัตต์ ซึ่งพลังงานสูงมากนี้สามารถเจาะทะลุเพชรให้เป็นรูเล็ก ๆ ได้ สามารถใช้เชื่อมและตัดโลหะแข็ง ๆ ได้ แสงเลเซอร์เป็นลำตรงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการสำรวจต่าง ๆ เช่น วาดแนวสะพานซึ่งจะทำให้ผิดไปน้อยมาก ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ผ่าตัดนิ่วไต และอื่น ๆ อีกมาก



รูปที่ 2.30 ระดับพลังงานของอะตอมโคโรเมียม

ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ เป็นเลเซอร์แก๊สที่เป็นส่วนผสมระหว่างแก๊สฮีเลียมและแก๊สนีออน โดยปกติเลเซอร์ชนิดจะถูกหุ้มปิดตาย และทำงานในโหมดควอสิคอนทินิวอัส (Quasicontinuous) ด้วยกำลังที่อยู่ในหน่วยมิลลิวัตต์ ฮีเลียมนีออนเลเซอร์จะให้แสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 632 นาโนเมตร และฮีเลียมนีออนเลเซอร์เป็นเลเซอร์ที่เบา ย้ายต่อการเคลื่อนย้าย และเสถียรภาพสูง ซึ่งปกติจะนำมาใช้งานที่ไม่ต้องการกำลังสูงๆ หรือใช้เป็นตัวนำเพื่อกำหนดเป้าหมาย โดยใช้ร่วมกับเลเซอร์ชนิดอื่นๆ ที่ไม่สามารถมองเห็น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ ในกรณีนี้คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์จะเป็นตัวปฏิบัติงาน ซึ่งอาจจะเป็นการตัด เจาะ แต่เนื่องจากความยาวคลื่นของคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์อยู่ในช่วงที่ตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

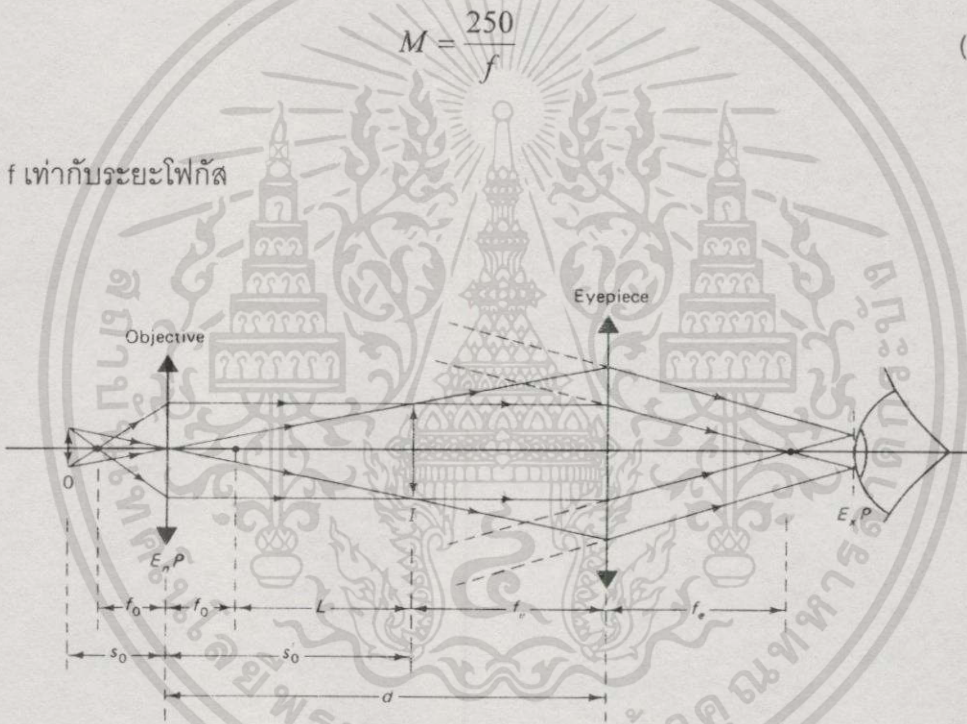
ทองไม่เห็น ดังนั้นจึงใช้ฮีเลียมไอออนเลเซอร์เป็นตัวกำหนดเป้าหมาย โดยใช้เลเซอร์ทั้ง 2 ชนิดพร้อมกัน

2.6 กล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (Optical microscope)

กล้องจุลทรรศน์ทำหน้าที่ขยายวัตถุเล็กๆ ให้เป็นภาพใหญ่ขึ้น จากตัวอย่างของแว่นขยายที่เห็นกันทั่วไป เลนส์ที่ใช้ในแว่นขยายจะเป็นเลนส์นูน เมื่อระยะวัตถุอยู่ใกล้กว่าจุดโฟกัส จะให้ภาพเสมือนขนาดขยายที่ระยะนัยน์ตา ตามปกติระยะนัยน์ตาเท่ากับ 250 มิลลิเมตร ดังนั้นกำลังขยายของแว่นขยายจะเท่ากับ

$$M = \frac{250}{f} \tag{2.32}$$

เมื่อ f เท่ากับระยะโฟกัส



รูปที่ 2.31 แสดงการสร้างภาพของกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง

กล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วยเลนส์นูนที่มีทางยาวโฟกัสสั้น ๆ 2 ชิ้น คือ เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective len) และเลนส์ใกล้ตา (Eyepiece) ดังรูป 2.31 เลนส์ใกล้วัตถุทำหน้าที่ให้ภาพจริง และเลนส์ใกล้ตาทำหน้าที่ขยายให้เห็นชัดที่ระยะปกติของนัยน์ตาคือที่ระยะ 250 มิลลิเมตร ระยะโฟกัสของระบบที่มีเลนส์ 2 ชิ้นเท่ากับ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_o} + \frac{1}{f_e} - \frac{1}{f_o f_e} \tag{2.33}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนที่ในสมการที่ 2.32

$$M = \frac{250(f_e + f_o - d)}{f_o f_e} \quad (2.34)$$

ใช้สมการเลนส์บางของนิวตัน (Newtonian equation for the thin lens) จะได้อัตราส่วนของระยะทางจากภาพถึงเลนส์ใกล้วัตถุเท่ากับ

$$\frac{s'_o}{s_o} = \frac{d - f_e - f_o}{f_o f_e} \quad (2.35)$$

จากรูปจะเห็นได้ว่า $s'_o = d - f_e$ แทนค่าในสมการ

$$M = -\frac{250 s'_o}{f_e s_o} \quad (2.36)$$

จากสมการจะเห็นว่ามีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึงได้ภาพเสมือนและจากสมการเลนส์บางของนิวตันกำลังขยายเนื่องจากเลนส์ใกล้วัตถุ จะเท่ากับ

$$m_o = \frac{L}{f_o} \quad (2.37)$$

และกำลังขยายเนื่องจากเลนส์ใกล้ตา

$$m_e = \frac{d}{f_e} \quad (2.38)$$

ดังนั้นกำลังขยายรวมของกล้อง

$$m = m_o * m_e = \frac{L}{f_o} * \frac{d}{f_e} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

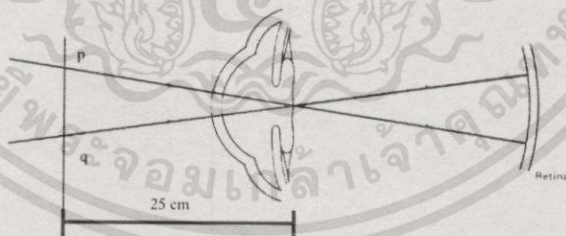
ในทางปฏิบัติ L คือ ระยะจากเลนส์ใกล้วัตถุถึงเลนส์ใกล้ตามีค่าคงที่ 160 มิลลิเมตร และ d คือระยะนัยน์ตาตามปกติเท่ากับ 250 มิลลิเมตร ถ้า L และ d คงที่ กำลังขยายจะขึ้นกับ ทางยาวโฟกัสของเลนส์ทั้งสอง

กำลังขยายของกล้องขึ้นกับค่ากำลังแยก (Resolving Power) ของเลนส์ ซึ่งก็คือระยะ น้อยที่สุดระหว่างจุดสองจุดซึ่งให้ภาพที่แยกจากกันได้ตามกฎของเรย์เลห์ (Rayleigh Criterion)

$$R = \frac{\lambda}{2n \sin \theta} \quad (2.40)$$

เมื่อ	R	เป็นกำลังแยก
	λ	เป็นความยาวช่วงคลื่นของแสงที่ใช้
	n	เป็นดัชนีหักเหของตัวกลางซึ่งวัตถุอยู่
	θ	เป็นครึ่งหนึ่งของมุมที่กรวยแสงเข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ

สำหรับกล้องจุลทรรศน์ที่มีค่า $2n \sin \theta \approx 3$ จะได้ $R = \frac{\lambda}{3}$ และกำลังแยกของนัยน์ตา เราประมาณ 100 ไมโครเมตร เมื่อวัตถุอยู่ที่ระยะ 250 มิลลิเมตร ดังรูป 2.32 ซึ่งหมายความว่า ถ้าจุด Q และ P อยู่ห่างกันน้อยกว่า 100 ไมโครเมตร เราจะเห็นเป็นจุดเดียวกัน



รูปที่ 2.32 กำลังแยกขยายของตา

กำลังขยายที่เหมาะสมของกล้องเท่ากับ $\frac{10^{-3}}{\lambda} \approx \frac{3 \times 10^{-3}}{\lambda}$ มิลลิเมตร

เช่นถ้าแสงขาวมีความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร (5.5×10^{-6}) จะได้กำลังขยาย ประมาณ 550 เท่า ในกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาจะมีเลนส์ใกล้ตาที่กำหนดค่าแน่นอนเป็น

มาตรฐานไว้แล้ว จะใช้การเปลี่ยนเลนส์ใกล้วัตถุ เพื่อเพิ่มกำลังขยาย โดยบอกเป็นจำนวนเท่าของการขยายพร้อมกับค่า NA ซึ่งหมายถึงความสว่างของเลนส์ มีค่าตั้งแต่ 0.08 ถึง 1.30 ขึ้นอยู่กับการออกแบบเลนส์ โดยคำนึงถึงค่าความคลาดและข้อจำกัดในการเลี้ยวเบน

2.7 กล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส (Atomic force microscope)

กล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างภาพภูมิประเทศ โดยการกวาดโพรบที่มีปลายแหลมบนพื้นผิวของวัตถุ โพรบที่มีปลายแหลมนั้นติดตั้งอยู่บนคานสปริงหรือที่เรียกว่าแคนทิลีเวอร์ ซึ่งสามารถโค้งงอได้ ตามแรงระหว่างปลายของโพรบกับพื้นผิวของตัวอย่าง ภาพของพื้นผิวดังกล่าวนี้เกิดจากการกวาดแบบ raster และตรวจจับการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของแคนทิลีเวอร์ เพื่อสร้างออกมาเป็นภาพภูมิประเทศ ผลที่ได้จากการตรวจจับการเคลื่อนที่ของแคนทิลีเวอร์ แสดงออกมาเป็นสีต่างๆ ตามระดับความสูงของพื้นผิวดังกล่าว



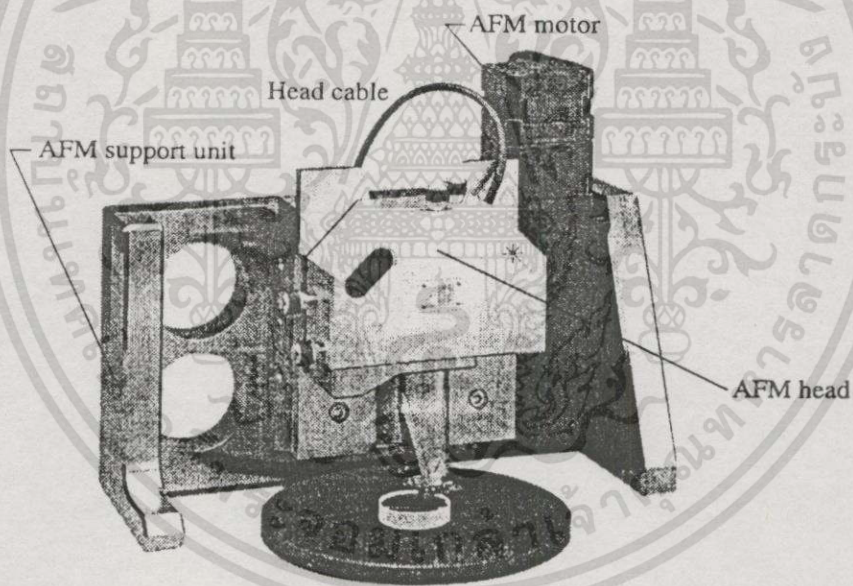
รูปที่ 2.33 แสดงกล้องจุลทรรศน์กลับด้าน

ระบบของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส จะอาศัยโครงสร้างหลักที่มีอยู่แล้วของจุลทรรศน์กลับด้าน (Inverted optical microscope) ดังแสดงในรูปที่ 2.33 เช่น XY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

translation stage ระบบสุญญากาศที่ใช้จับยึดสไลด์และเพิ่มส่วนของโครงโลหะทางด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 2.34 เพื่อใช้ติดตั้งหัวกวาด (Scanning head) ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถดูพื้นผิวของตัวอย่างได้ก่อนจะทำการกวาดด้วยโพรบ

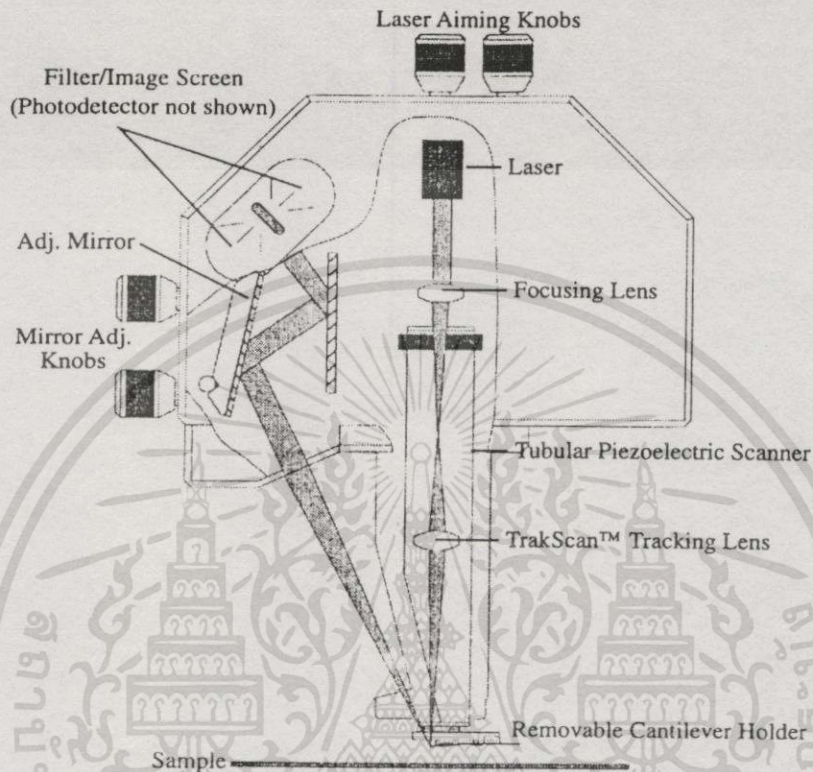
เนื่องจากในกล้องจุลทรรศน์แบบกลับด้านนี้ตัวเลนส์ใกล้วัตถุ จะติดตั้งไว้ทางด้านล่างของตัวอย่าง ซึ่งต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบปกติที่จะติดตั้งเลนส์ใกล้วัตถุไว้เหนือตัวอย่าง และเนื่องจากหัวกวาดของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสจำเป็นต้องติดตั้งไว้เหนือตัวอย่าง เพื่อที่จะสะดวกในการติดตั้งหัวกวาด การเปลี่ยนโพรบ การวางตัวอย่าง และก่อนที่จะมีการปฏิบัติการด้วยกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส จะต้องมีการกำหนดพื้นที่คร่าวๆ ที่จะทำการกวาดก่อน เพราะเนื่องจากขนาดของภาพที่ต้องการกวาดมีขนาดเล็ก ไม่สามารถใช้ตาเปล่าดู และกำหนดเป้าหมายที่ชัดเจนได้ ซึ่งจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์กลับด้านดูพื้นที่ที่ต้องการกวาดก่อน ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์ปกติจึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้



รูปที่ 2.34 แสดงหัวของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส

ในรูปที่ 2.35 แสดงโครงสร้างภายในของหัวกวาดของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส การกวาดของหัวโพรบจะอาศัยการเคลื่อนที่ของเพียโซ 3 แกน X Y และ Z การโค้งงอหรือการออกซิเลทของแคนทิลีเวอร์ จะตรวจจับได้จากแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากหลังของแคนทิลีเวอร์ การโฟกัสแสงเลเซอร์ลงบนหลังของแคนทิลีเวอร์ สามารถทำได้ โดยการปรับสูงทางด้านบน

ปรับได้ทั้งในแนว x และแนว y และสกรูทางด้านข้างใช้ปรับ เพื่อให้แสงเลเซอร์ ที่สะท้อนกลับมาจากหลังของแคนทิลีเวอร์ โฟกัสอยู่ตรงกลางของโฟโตไดโอดแบบสี่ส่วนพอดี



รูปที่ 2.35 แสดงการโฟกัสแสงบนแคนทิลีเวอร์ ของหัวกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกพอส

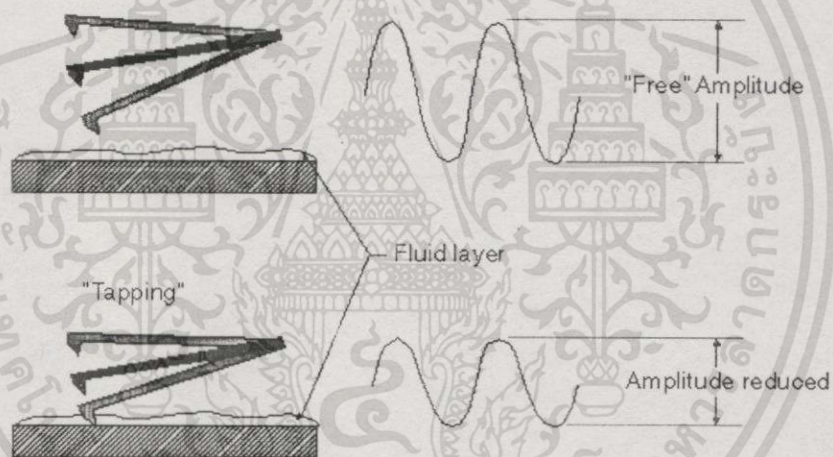
กล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกพอส สามารถทำงานได้ 2 โหมดคือ

2.7.1 การทำงานในโหมดสัมผัส (Contact mode)

เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการได้ภาพภูมิประเทศ จากกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกพอส การทำงานในโหมดนี้ แคนทิลีเวอร์จะสัมผัสพื้นผิวของตัวอย่างอย่างนิ่มนวล และเพื่อให้ใช้แรงน้อยที่สุดในการสัมผัสกับพื้นผิวดตัวอย่าง จะใช้วงจบบ่อนกลับ เพื่อพยายามรักษาค่าคงที่ของการเบี่ยงเบนของแคนทิลีเวอร์ ขณะที่ทำการกวาด และเพื่อให้ได้อย่างที่กล่าว การเคลื่อนที่ของเพียโซ จะต้องวิ่งขึ้นลงตามลักษณะภูมิประเทศของพื้นผิวของตัวอย่าง และส่วนคอมพิวเตอร์ของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกพอส จะสร้างภาพจากการเก็บค่าลักษณะการขึ้นลงของเพียโซ

2.7.2 การทำงานในโหมดแตะ (Tapping mode)

เป็นการทำงานอีกแบบหนึ่งที่สำคัญ เพื่อให้ได้ภาพภูมิประเทศกับตัวอย่างที่หลากหลายกว่าการทำงานในโหมดสัมผัส โดยการทำงานในโหมดนี้ แคนทิลเวอร์ จะถูกทำให้สั่นที่ความถี่กัมธรร (Resonant) และหลังจากนั้นแคนทิลเวอร์จะค่อยๆ เคลื่อนเข้าสู่ตัวอย่างจนกระทั่งเมื่อเริ่มแตะ แอมพลิจูดของการสั่นจะลดลง และเนื่องจากปลายโพรบสัมผัสพื้นผิวของตัวอย่างเป็นเวลาดสั้นๆ จึงไม่เกิดแรงเสียดทาน และไม่เป็นการทำลายพื้นผิวของตัวอย่างที่มีความอ่อนนุ่ม เมื่อเทียบกับการทำงานในโหมดสัมผัส เมื่อปลายโพรบเริ่มแตะที่พื้นผิวของตัวอย่าง แอมพลิจูดในการออสซิลเลทจะเริ่มลดลง วงจรป้อนกลับจะปรับระดับของเพียโซในแนวแกน Z เพื่อให้แอมพลิจูดการออสซิลเลทคงที่เท่าเดิม และภาพภูมิประเทศที่ได้ก็เกิดจากการเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ขึ้นลงตามลักษณะภูมิประเทศของพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 แสดงการทำงานในโหมดแตะ

2.8 กล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field

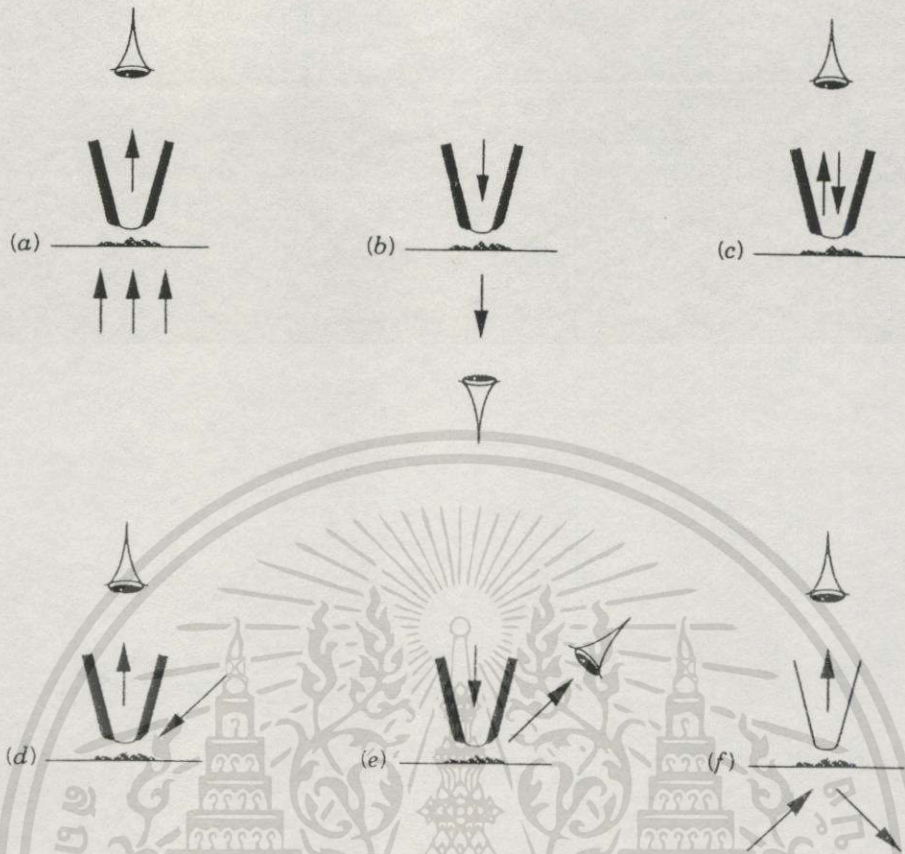
กล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field เป็นกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงอีกแบบหนึ่งที่สามารถข้ามข้อจำกัดทางด้านแสง และให้ความละเอียดหรืออัตราขยายของภาพเชิงแสงที่สูงกว่า กล้องจุลทรรศน์เชิงแสงทั่วๆ ไปได้ เนื่องจากไม่ได้ใช้เลนส์มาทำการขยายภาพ แต่เป็นการใช้ท่อนำแสงที่มีขนาดเล็กๆ ทำการส่งหรือรับแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง ที่ระยะน้อยกว่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ จึงเป็นที่มาของชื่อ near-field

ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field อยู่ 3 อย่าง คือ หนึ่ง ท่อนำแสงที่มีขนาดเล็ก ที่สามารถปกป้องแสงไว้ภายในได้ สอง ระบบกลไกที่สามารถนำท่อนำแสงนี้เข้าไปใกล้ตัวอย่างโดยที่ไม่สัมผัสตัวอย่าง ตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการกวาดท่อนำแสง และสาม ระบบกลไกที่ใช้ในการกวาดที่มีความละเอียดสูง เพราะภาพที่ได้จากการกวาดจะเป็นการเก็บข้อมูลเป็นจุดๆ แต่ด้วยพัฒนาการของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส ที่มีมานานกว่า 10 ปี ทำให้มีกลไกในการกวาดที่มีความละเอียดสูง และมีเทคนิคในการรักษาระดับของโพรมิไม่ให้สัมผัสกับพื้นผิวตัวอย่าง อยู่อย่างมากมาย ทั้งที่เป็นงานวิจัยและที่ทำเป็นสินค้าออกมาขาย

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field แบ่งออกได้ 6 โหมด คือ

- Collection mode
- Illuminatioin mode
- Collection and illumination mode
- Oblique mode
- Oblique and illumination mode
- Dark field mode

การทำงานทั้ง 6 โหมดของกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field แสดงในรูปที่ 2.37 รูปดวงตาหมายถึงเอาท์พุทของแสง เพื่อจะนำไปสร้างภาพ หรือเป็นโฟโตไดโอด



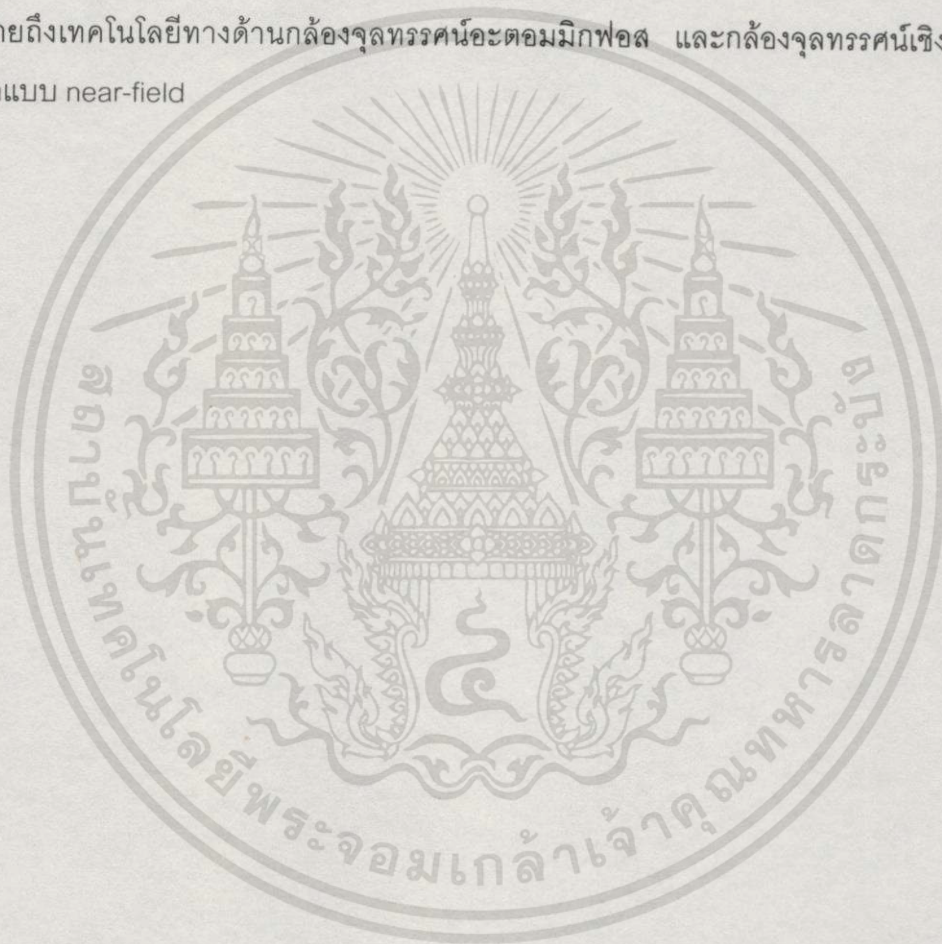
รูปที่ 2.37 การทำงานทั้ง 6 โหมดของกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field (a) Collection mode (b) Illumination mode (c) Collection and illumination mode (d) Oblique mode (e) Oblique and illumination mode (f) Dark field mode

ในโหมดคอลเลกชันของกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field แสดงในรูปที่ 2.37 (a) แสงที่ถูกรวบรวมใช้สร้างภาพเป็นแสง near-field หลังจากส่องผ่านตัวอย่าง แสงจะผ่านไปช่องทางเปิดที่ปลายของใยแก้วนำแสง โดยมีแหล่งกำเนิดเป็นแสงแบบ far-field ในโหมดอินลูมิเนท แสดงในรูปที่ 2.37 (b) แสง near-field จะส่งออกจากปลายของใยแก้วนำแสง ผ่านตัวอย่าง แต่แสงที่ใช้สร้างภาพเป็นแสง far-field ในโหมดคอลเลกชันและอินลูมิเนท ในรูปที่ 2.37 (c) แหล่งกำเนิดแสงจะผ่านปลายของใยแก้วนำแสง แล้วผ่านตัวอย่างและแสงสะท้อนให้ทำเป็นภาพก็ผ่านทางช่องเดียวกัน ในโหมดออบลิค คอลเลกชัน แสดงในรูปที่ 2.37 (d) แสงจะส่องเฉียงๆ จากทางด้านข้างและสะท้อนของผิวของตัวอย่าง ผ่านเข้าไปที่ปลายเปิดของใยแก้วนำแสง ในโหมดออบลิค อินลูมิเนท แสดงในรูปที่ 2.37 (e) แสงจะส่งออกจากปลายของใยแก้วนำแสง ผ่านตัวอย่าง และแสงที่ใช้สร้างภาพเป็นแสงที่สะท้อนออกทางด้านข้าง โหมดดาร์คฟีลด์

แสดงในรูปที่ 2.37 (f) แสงจะเกิดการหักเหที่แผ่นรองตัวอย่าง แล้วใช้ใยแก้วนำแสงที่ไม่มีการเคลือบมารับแสงดาคีฟว

2.9 สรุป

ในบทนี้เป็นทฤษฎีพื้นฐานที่จะนำไปใช้ในการวิจัย เพื่อการผลิตโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอแบบ near-field โดยจะอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานทางแสงที่เกี่ยวข้อง ข้อจำกัดของต่างๆ เช่น ข้อจำกัดในการเลี้ยวเบนของคลื่น ข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์ซึ่งใช้เลนส์ และอธิบายถึงเทคโนโลยีทางด้านกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส และกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงที่กวาดแบบ near-field



บทที่ 3

การพัฒนาเครื่องดึงและงอใยแก้วนำแสง

ในบทนี้จะเป็นขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่ การออกแบบและการสร้างเครื่องดึงใยแก้วนำแสง (Optical fiber puller machine) เพื่อใช้ผลิตโพรบชนิดงอแบบ near-field รวมทั้งการดึง การงอ และการเคลือบใยแก้วนำแสงด้วยทองคำ ต่อจากนั้นจะเป็นการติดตั้งใยแก้วนำแสงชนิดงอบนฐานอลูมิเนียม เพื่อทำเป็นแคนทิลีเวอร์ (Cantilever) และการติดตั้งแคนทิลีเวอร์เข้ากับกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส (Atomic Force Microscope) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดดังต่อไปนี้

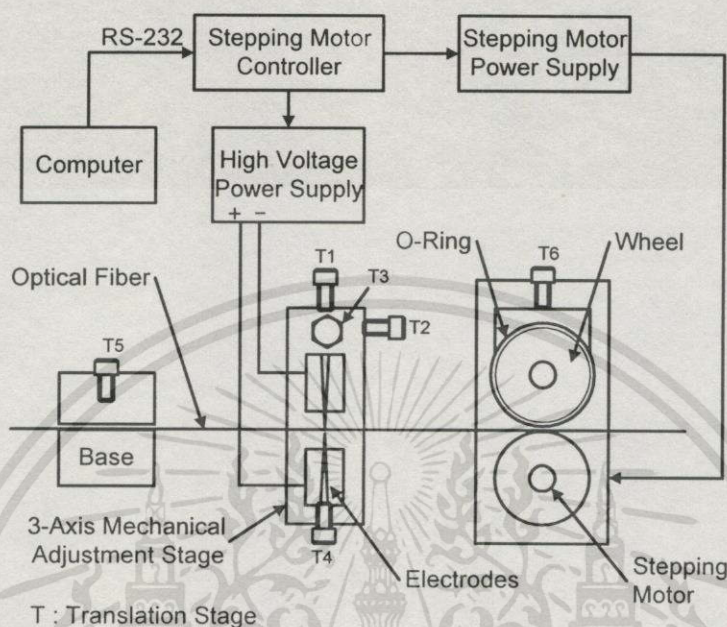
3.1 เครื่องดึงใยแก้วนำแสง (Optical fiber puller machine)

เครื่องดึงใยแก้วนำแสงนี้ ประกอบด้วยส่วนสำคัญใหญ่ๆ 3 ส่วนคือ เครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง เครื่องกลที่ใช้ในการจับยึดใยแก้วนำแสงและตัวควบคุมสแต็ปมอเตอร์ เพื่อใช้สำหรับการดึงและการงอใยแก้วนำแสงให้มีปลายแหลม โดยการให้ความร้อนกับใยแก้วนำแสงตรงบริเวณที่ต้องการจะให้เป็ปลายแหลม และใช้แรงดึงเพื่อให้บริเวณที่โดนความร้อนและกำลังหลอมเหลว มีขนาดเล็กลงกลายเป็นปลายแหลมได้ ด้วยความร้อนและความเร็วที่เหมาะสม ความร้อนที่ใช้ในการทดลองนี้ เกิดขึ้นจากการอาร์กด้วยไฟฟ้าสลับแรงดันสูง ในส่วนของเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูงที่สร้างขึ้นนี้สามารถควบคุมเวลาในการให้ความร้อนได้ ในส่วนของเครื่องกล ใช้สำหรับจับยึดและปรับระดับใยแก้วนำแสงให้ตรงกับแนวของการอาร์กด้วยไฟฟ้า และในส่วนของตัวควบคุมสแต็ปมอเตอร์ ซึ่งใช้เป็นต้นกำลังในการดึง เมื่อขณะเกิดการอาร์ก และสามารถควบคุมความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปมอเตอร์หยุดหมุน ความเร่ง และระยะทางในการดึงได้ ในรูปที่ 3.1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องดึงใยแก้วนำแสง

3.1.1 เครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง (AC High voltage power supply)

เครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูงนี้ เป็นการออกแบบเพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนในการให้ความร้อนกับใยแก้วนำแสง โดยสามารถทนต่อสภาวะการเกิดการลัดวงจรได้เป็นเวลานานๆ และให้ความร้อนเป็นบริเวณเล็กๆ ซึ่งสามารถทำได้โดยการออกแบบเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูงให้มีเอาพุทอิมพีแดนซ์ที่สูง ทำให้สามารถคงสภาพการเกิดการอาร์กได้ตลอดเวลาที่ใช้งาน ในสภาพการใช้งานจริงจะอยู่ที่ประมาณ 10-50 วินาที โดยแรงดันไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่

ประมาณ 1,500 โวลต์ กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 15 มิลลิแอมป์ และสามารถสั่งให้เปิดหรือปิดได้ด้วยสัญญาณลอจิก 5 โวลต์จากภายนอกได้ด้วย

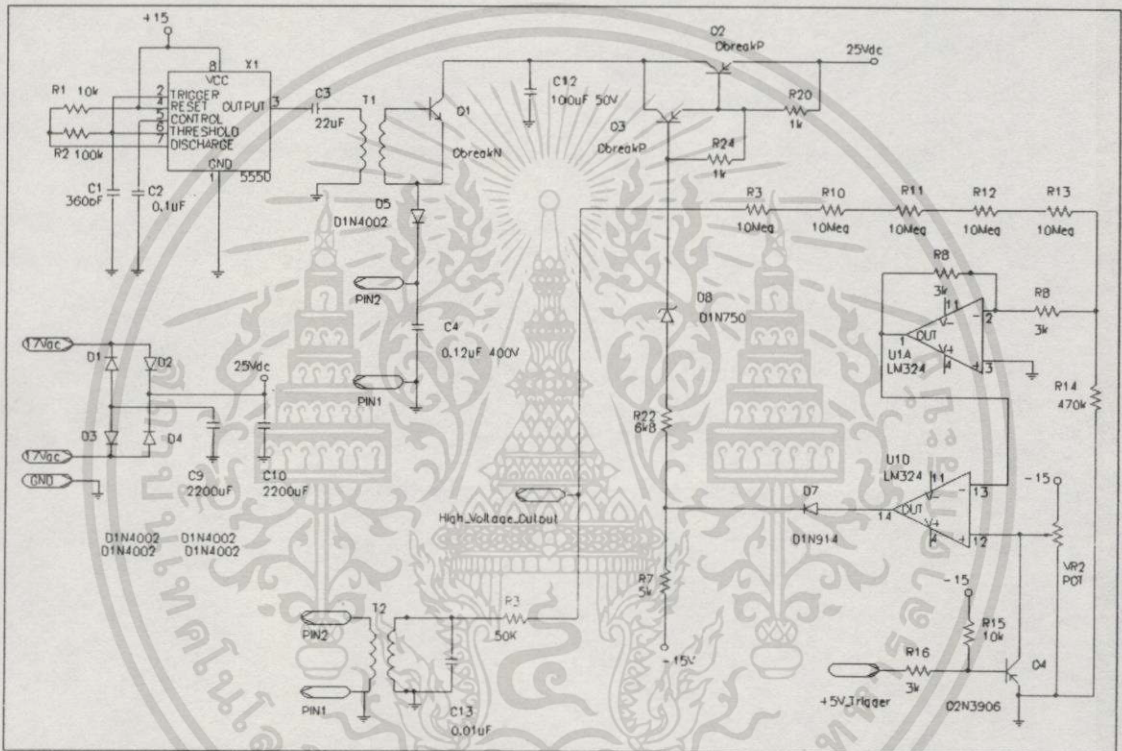


รูปที่ 3.1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องตั้งใยแก้วนำแสง

ในหลักการของเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูงต่างๆ ไป จะพยายามออกแบบให้มีเอาพุทอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ เพื่อที่จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูง ตามความต้านทานที่ต่อเป็นโหลด ซึ่งถ้านำเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูงเอาพุทอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ มาใช้งานในสภาพการเกิดการลัดวงจรตลอดเวลา จะทำให้ทำให้เครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับเกิดความเสียหายขึ้นได้ และความร้อนที่ได้จากการอาร์ก จะเกิดความร้อนเป็นบริเวณกว้างและไม่สม่ำเสมอ

วงจรของเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 โดยเริ่มจากใช้ IC NE555 กำเนิดคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมแบบสมมาตร (Symmetric) ที่ความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิร์ต ด้วย $R1 = 10$ กิโลโอห์ม $R2 = 100$ กิโลโอห์ม และ $C1 = 360$ พิโคฟารัด ที่แรงดันขนาด 15 โวลต์ ตามสมการ 3.1 โดยที่ขา 3 ของ IC NE555 จะใช้ขับทรานซิสเตอร์ Q1 ที่ขาเบส ทรานซิสเตอร์ Q1 โดยมีหม้อแปลง T1 ทำหน้าที่เป็นหม้อแปลงคัลป์ปิง โดยมีอัตราส่วนที่ 1 ต่อ 1 ทรานซิสเตอร์ Q1 จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ใช้เปิดปิดวงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง T2 ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ต โดยมีไดโอด D5 เป็นตัวป้องกัน Q1 จากกระแสย้อนกลับของหม้อแปลง T2 เมื่อสนามแม่เหล็กเกิดการหดตัว แรงดันไฟฟ้าที่ขาอิมิตเตอร์ของ Q1 จะมีค่าประมาณ 24 โวลต์ เมื่อคิดแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ ที่ขาคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์ ($V_{CE(sat)}$) ประมาณ

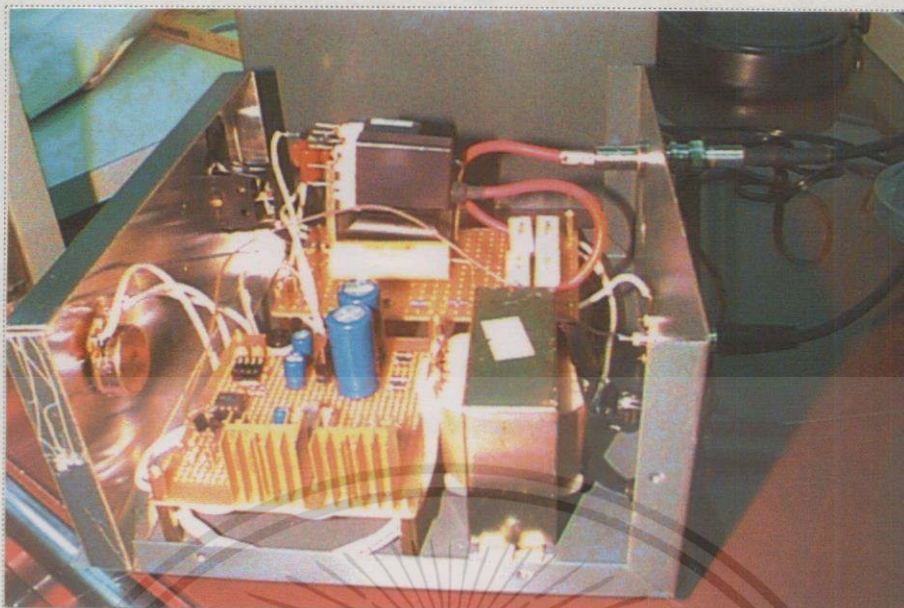
0.2 โวลต์ ทั้ง Q1 และ Q2 และแรงดันตกคร่อมไดโอด D5 เท่ากับ 0.6 โวลต์ และเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้เครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูงได้ถูกจำกัดให้จ่ายกระแสได้สูงสุดที่ 1.5 แอมป์และแรงดันสูงสุดที่ 25 โวลต์ เพราะฉะนั้นกำลังไฟฟ้าที่จุดนี้จะเท่ากับ 36 วัตต์ ($P = E \times I$) และด้วยอัตราส่วนของหม้อแปลง T2 เท่ากับ 65 เท่า ซึ่งจะได้แรงดันที่ขดทุติยภูมิของหม้อแปลง T2 ประมาณ 1,500 โวลต์ที่กระแสสูงสุด 18 มิลลิแอมป์ เมื่อคิดประสิทธิภาพของหม้อแปลง T2 ที่ประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.2 แสดงวงจรของเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง

$$f = \frac{1.443}{(R_1 + 2R_2)C_1} \tag{3.1}$$

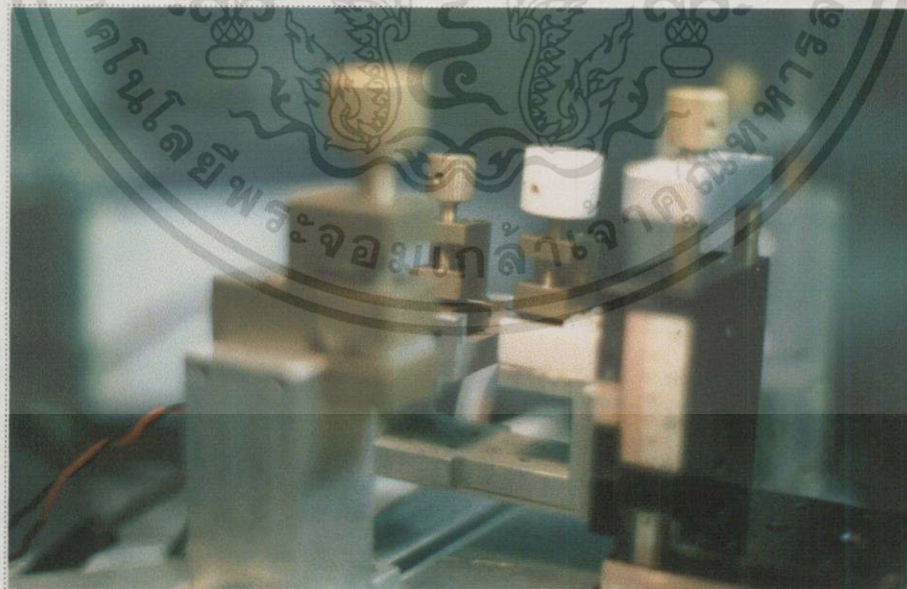
สำหรับทรานซิสเตอร์ Q2 ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงดันที่เข้าขาคอลเลคเตอร์ของ Q1 โดยทรานซิสเตอร์ Q2 จะต้องจรแบบดาไล่งตันกับทรานซิสเตอร์ Q3 เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการขยายกระแส และขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q3 จะถูกควบคุมโดยวงจรเปรียบเทียบแรงดัน U1D ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบแรงดันเอาพุทผ่านตัวต้านทาน R9 ถึง R 13 = 50 เมกกะโอมห์ กับตัวต้านทาน R14 = 470 กิโลโอมห์ที่ต่อเป็นวงจรแบ่งแรงดัน โดย U1D จะเปรียบเทียบแรง



รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่ายด้านข้างของเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง

3.1.2 เครื่องกลจับยึดโยแก้วนำแสง

เครื่องกลจับยึดโยแก้วนำแสงนี้เป็นชิ้นส่วนกลไกที่ใช้ในการจับยึดโยแก้วนำแสง ขณะที่ทำการตั้ง และการงอโยแก้วนำแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ถึง รูปที่ 3.7 ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนประกอบย่อย 3 ส่วนด้วยกันคือ



รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายของตัวปรับ T5 ตัวจับเข็มไฟฟ้าแรงดันสูงของขั้วลบและขั้วบวก

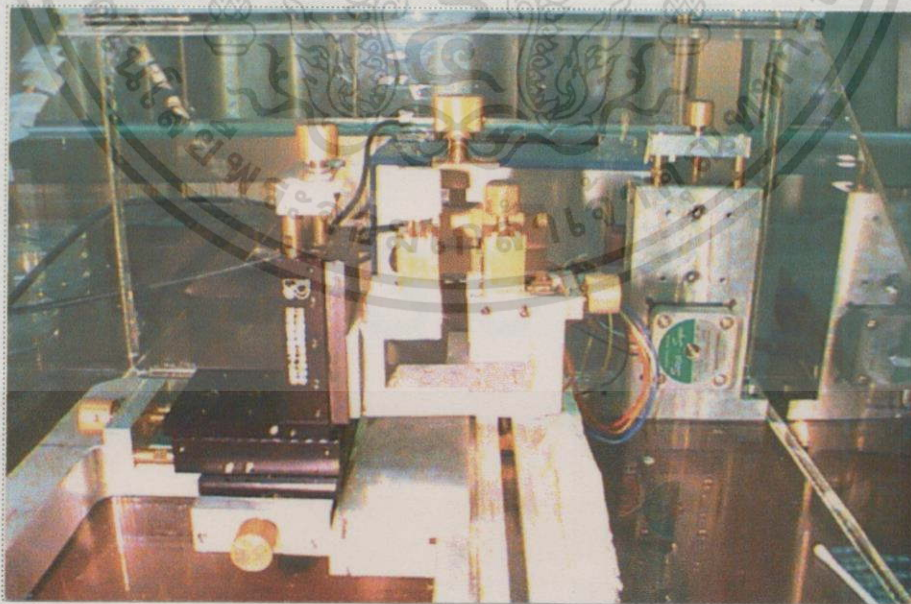
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.1 ฐานยึดโยแก้วนำแสง T5

ทำหน้าที่ยึดโยแก้วนำแสง ทางด้านซ้ายไว้ในขณะที่เกิดการดึง โดยมีร่องตรงกลางที่ฐานลึก 0.2 มิลลิเมตร ตามแนวการวางโยแก้วนำแสง เพื่อใช้วางโยแก้วนำแสงขนาด 250 ไมโครเมตร โดยแรงที่ยึดนั้นเกิดจากการขันสกรูทางด้านบนของฐานจับยึด โดยมียางรองที่สกรูหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร โดยแรงที่ใช้เป็นการขันเพียงเพื่อยึดโยแก้วนำแสงไว้เท่านั้น โดยฐานนี้ใช้ในการจับยึดโยแก้วนำแสง เพื่อกำหนดและการวางโยแก้วนำแสงด้วย

3.1.2.2 แท่นยึดเข็มไฟฟ้าแรงดันสูง

ทำหน้าที่ยึดเข็มไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในการดึงและวางโยแก้วนำแสง โดยประกอบด้วย T1 T2 T3 และ T4 แท่นยึดเข็มไฟฟ้าแรงดันสูงนี้ ประกอบไปด้วยตัวปรับการเคลื่อนที่ของเข็ม ให้เข็มสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งหมด 3 แกนด้วยกัน คือ T1 ปรับให้เข็มเลื่อนเข้าออกในแนวแกน Y (เข้าและออก) T2 ปรับให้เข็มเลื่อนเข้าออกในแนวแกน X (ซ้ายและขวา) และ T3 ปรับให้เข็มเลื่อนเข้าออกในแนวแกน Z (ขึ้นและลง) ส่วน T4 เป็นตัวปรับระยะห่างระหว่างเข็มไฟฟ้าแรงดันสูง โดยมีสกรูอีก 2 ตัวใช้ยึดเข็มไฟฟ้าแรงดันสูงให้ติดแน่นกับฐาน หัวสกรูที่ใช้ยึดเข็มที่เป็นหัวบวกรจะทำจากเซรามิก (ดังแสดงในรูป 3.5 จะเป็นสีขาว) เพื่อป้องกันอุบัติเหตุขณะปฏิบัติงาน เข็มไฟฟ้าแรงดันสูงนี้ทำจากโลหะทังสเตนของบริษัท Teledyne รุ่นสีแดง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ฝนด้วยเครื่องขัดกระดาษทรายจนมีมุมโคนประมาณ 15 องศา และวางห่างกันประมาณ 2 มิลลิเมตร

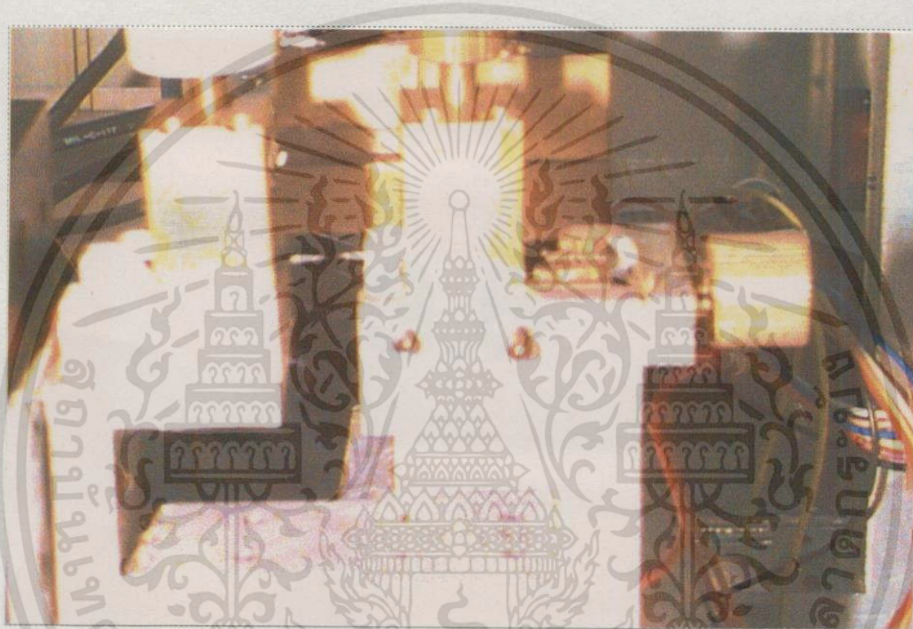


รูปที่ 3.6 แสดงภาพถ่ายของตัวปรับ T1 T2 T3 ทางซ้าย และ T5 ตรงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.3 ตัวดึงใยแก้วนำแสง

ซึ่งประกอบด้วยตัวปรับ T6 สเต็ปป์มอเตอร์และวงล้ออย่าง ประกอบด้วยวงล้อบนและวงล้อล่างขนาด 50 มิลลิเมตรเท่ากับ 2 วง โดยวงล้อบนจะทำเป็นร่องลึก เพื่อเอาไว้ใส่วงแหวนยางหนาประมาณ 4 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดแรงเสียดทาน และวงล้อล่างจะต่อเข้ากับแกนเพลลาของสเต็ปป์มอเตอร์ของบริษัท Sanyo Denki รุ่น 103H548 ซึ่งจะหมุน 1.8 องศาต่อขั้น (1.8 degree per step) 4 เฟส และสามารถเลื่อนวงล้อบนให้ขึ้นลงด้วยตัวปรับ T6 เพื่อใช้ยึดใยแก้วนำแสงไว้ให้แน่น ในขณะที่เกิดการดึง



รูปที่ 3.7 แสดงภาพถ่ายของใยไฟฟ้าแรงดันสูงในระยะใกล้

3.1.3 ตัวควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์

ตัวควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์เป็นแบบ Microstep ของบริษัท Parker รุ่น OEM350X ซึ่งสามารถทำให้สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 200 ขั้นต่อรอบ เป็นแบบ 25,000 ขั้น ต่อรอบได้ และสามารถควบคุมความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สเต็ปป์มอเตอร์หยุดหมุน ความเร่ง และระยะทางได้อย่างแม่นยำ และสามารถส่งเอาท์พุท 5 โวลท์ไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้ ในงานวิจัยนี้ใช้ควบคุมเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง และตัวควบคุมมอเตอร์จะถูกควบคุมผ่านพอร์ตอนุกรม RS-232 จากคอมพิวเตอร์ภายนอก การควบคุมสามารถทำได้โดยการส่งคำสั่ง ซึ่งเป็นคำสั่งเฉพาะผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS-232 โดยคำสั่งที่ใช้ในการทดลองนี้มีดังนี้

- T คือการหน่วงเวลาก่อนที่จะสั่งให้มอเตอร์หมุน มีหน่วยเป็นวินาที
- A คือความเร่งในการหมุนมอเตอร์ มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที วินาที
- V คือความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปป์มอเตอร์หยุดหมุน มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที
- D คือระยะทางที่หมุนไป มีหน่วยเป็นขั้น โดยที่ 1 ขั้นเท่ากับระยะทาง 6.3 ไมโครเมตร และ 1 รอบ เท่ากับ 157 มิลลิเมตร ($3.14 \times 50 = 157$) เมื่อคำนวณที่วงล้อขนาด 50 มิลลิเมตรและมอเตอร์หมุน 25,000 ขั้นต่อรอบ (1 step = $157/25,000 = 0.0063$)

แสดงตัวอย่างของโปรแกรมดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการดึงใยแก้วนำแสง

1.	O01	ส่งแรงดัน 5 โวลต์ไปที่เครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง
3.	T	หน่วงเวลา
3.	A	ความเร่ง
3.	V	ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปป์มอเตอร์หยุดหมุน
5.	D	ระยะทาง
6.	G	โปรแกรมเริ่มทำงาน
7.	O00	หยุดส่งแรงดัน 5 โวลต์ไปที่เครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง
8.	S	โปรแกรมหยุดทำงาน

3.2 การดึงใยแก้วนำแสง

ใยแก้วนำแสง ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นใยแก้วนำแสง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 125 ไมโครเมตร ที่ใช้ในการสื่อสารแบบโหมดเดียว (Single mode communication optical fiber) รุ่น SMF1310 ซึ่งเป็นของบริษัท Prime Optical Fiber Corporation, Taiwan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีขนาดผ่าศูนย์กลางของแกนกลาง (Core, n1) 9 ไมโครเมตร และขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเปลือกนอก (Cladding, n2) 125 ไมโครเมตร และเปลือกหุ้ม (Jacket, n3) 250 ไมโครเมตร โดยผลการดึง จะได้ปลายที่มีความยาว 600-900 ไมโครเมตรและมีขนาดที่ปลายแหลมประมาณ 200-250 นาโนเมตร เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน ความเร็วในการดึงและระยะทางที่ดึง จะเป็นตัวกำหนดความยาวที่ปลาย (Taper Length) และขนาดของปลาย (Apex) ด้วย ต่อไปจะเป็นขั้นตอนในการดึงใยแก้วนำแสง

- ทำการลอกเปลือกหุ้ม (Jacket) พลาสติกชั้นนอกออกด้วยการแช่ใยแก้วนำแสงในส่วนที่ต้องการจะลอกออก ในน้ำยาอะซิโตน (Acetone) ประมาณ 5 นาที เนื่องจากส่วนที่เป็นเปลือกหุ้มชั้นนอกเป็นพลาสติกที่ติดไฟ เพราะถ้าไม่ลอกเปลือกหุ้มชั้นนี้ออก จะเกิดการลุกไหม้ ติดไฟ เนื่องจากความร้อนในขณะทำการดึงได้
- ทำการยึดปลายใยแก้วนำแสงทางด้านซ้ายก่อนบนฐานยึดใยแก้วนำแสง โดยใช้ตัวปรับ T5
- ลากใยแก้วนำแสง มาทางขวา วางพาดไปบนร่องของวงล้อล่างและชั้นตัวปรับ T6 เพื่อให้วงล้อบนกับวงล้อล่างอัดแน่นและยึดใยแก้วนำแสงไว้
- ปรับระดับของเข็มไฟฟ้าแรงดันสูงให้ตรงกับใยแก้วนำแสง ตรงบริเวณที่ลอกเปลือกหุ้มออกแล้ว ด้วยฐานเบอร์ T1 T2 และ T3
- ตั้งโปรแกรมที่คอมพิวเตอร์ เพื่อตั้งค่าพารามิเตอร์ เวลาในการให้ความร้อน ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแตปป์มอเตอร์หยุดหมุน ความเร่ง และระยะทาง
- สั่งให้โปรแกรมทำงาน ก็จะมีการให้ความร้อนขึ้นและมอเตอร์ทางด้านขวาจะดึงใยแก้วนำแสง ให้ขาดออกเป็น 2 ส่วน

เมื่อสั่งให้โปรแกรมทำงาน เครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูงจะจ่ายไฟมาที่เข็มไฟฟ้าแรงสูง ทำให้เกิดการอาร์ค เมื่อใยแก้วนำแสงได้รับความร้อนร้อนและเริ่มละลาย สแตปป์มอเตอร์ จะทำการดึงตามค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งไว้ ถ้าพารามิเตอร์ที่ตั้งไว้เหมาะสม จะทำให้ได้ใยแก้วนำแสงที่มีปลายเล็กและตรง

3.2.1 โปรแกรมควบคุมการดึงใยแก้วแบบที่ 1 (Test1.prg)

ตารางที่ 3.2 คือตารางควบคุมการดึงใยแก้วนำแสงแบบที่ 1 โดยในที่นี้ให้ชื่อว่า Test1.prg ซึ่งเป็นไปตามโปรแกรมในบรรทัดที่ 1 ถึง 7 เป็นการดึงโดยใช้ความร้อน และหลัง

จากนั้นก็จะเป็นการดึงโดยไม่ใช้ความร้อนในบรรทัดที่ 8 ถึง 12 การดึงด้วยความร้อนในครั้งแรกนั้น เพื่อให้แก้วหลอมละลาย และยืดแก้วออก ยาวประมาณ 600 ไมโครเมตร ด้วยการให้ความร้อน 4 วินาที ความเร่ง 5 รอบต่อวินาที² และความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สตีปิ้งมอเตอร์หยุดหมุน 5 รอบต่อวินาที แล้วจึงเป็นการดึงโดยไม่ใช้ความร้อน ด้วยความเร่ง 300 รอบต่อวินาที² ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สตีปิ้งมอเตอร์หยุดหมุน 15 รอบต่อวินาที และระยะทาง 6250 ชั้น หรือ 39.375 มิลลิเมตร เพื่อให้มันใจว่าใยแก้วนำแสงขาดออกจากกัน การดึงในขั้นที่ 2 เป็นการดึงด้วยความเร่งและความเร็วที่สูง เพื่อจะได้ปลายที่แหลมและตรง ที่สามารถทำการดึงโดยไม่ใช้ความร้อนได้ เนื่องจากยังคงมีความร้อนสะสมอยู่ในใยแก้วนำแสงอยู่ และถ้าเป็นการดึงใยแก้วนำแสงในแบบขั้นที่ 1 อย่างเดียว มักจะได้ปลายที่แหลมแต่โค้งจากแรงดึงดูดของโลก เนื่องจากยังมีความร้อนสะสมอยู่ จากโปรแกรมนี้จะได้ปลายที่มีความยาวประมาณ 800 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.2 โปรแกรม Test1.prg

บรรทัดที่	คำสั่ง	ตัวแปร	อธิบาย
1	O	01	การดึงครั้งที่ 1 แบบใช้ความร้อน
2	T	4	หน่วงเวลา 4 วินาที
3	A	5	หมุนด้วยความเร่ง 5 รอบต่อวินาที ²
4	V	5	ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สตีปิ้งมอเตอร์หยุดหมุน 5 รอบต่อวินาที
5	D	100	ระยะทาง 100 ชั้น
6	G		เริ่มทำงานขั้นที่ 1
7	O	00	ให้เอาท์พุท 01 หยุดส่งแรงดัน 5 โวลท์
8	A	300	หมุนด้วยความเร่ง 300 รอบต่อวินาที ²
9	V	15	ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สตีปิ้งมอเตอร์หยุดหมุน 15 รอบต่อวินาที
10	D	6250	ระยะทาง 6250 ชั้น
11	G		เริ่มทำงานขั้นที่ 2
12	S		หยุดโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งได้ตามโปรแกรม test1.prg ที่อัตราขยาย 50 เท่า

3.2.2 โปรแกรมควบคุมการดึงใยแก้วแบบที่ 2 (Test2.prg)

โปรแกรมนี้จะเหมือนกับโปรแกรม Test1.prg ดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยจะแตกต่างกันในบรรทัดที่ 4 โดยการลดความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปป์มอเตอร์หยุดหมุน ลงจาก 5 รอบต่อวินาที เป็น 3 รอบต่อวินาที เนื่องจากการดึงตามโปรแกรม Test1.prg จะให้ใยแก้วนำแสงที่ดึงแล้วมีปลายที่สั้น และจากการทดลองตามโปรแกรม Test2.prg จะได้ใยแก้วนำแสงที่ดึงแล้วมีความยาวเพิ่มขึ้นเป็น 950 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.3 โปรแกรม Test2.prg

บรรทัดที่	คำสั่ง	ตัวแปร	อธิบาย
1	O	01	การดึงครั้งที่ 1 แบบใช้ความร้อน
2	T	4	หน่วงเวลา 4 วินาที
3	A	5	หมุนด้วยความเร่ง 5 รอบต่อวินาที ²
4	V	3	ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปป์มอเตอร์หยุดหมุน 3 รอบต่อวินาที
5	D	100	ระยะทาง 100 ชั้น
6	G		เริ่มทำงานขั้นที่ 1
7	O	00	ให้เอาท์พุท 01 หยุดส่งแรงดัน 5 โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

			การดึงครั้งที่ 2 แบบไม่ใช้ความร้อน
8	A	300	หมุนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อวินาที ²
9	V	15	ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สตีปิ้ง มอเตอร์หยุดหมุน 15 รอบต่อวินาที
10	D	6250	ระยะทาง 6250 ชั้น
11	G		เริ่มทำงานขั้นที่ 2
12	S		หยุดโปรแกรม



รูปที่ 3.9 แสดงใยแก้วนำแสงที่ดึงได้ตามโปรแกรม test3.prg ที่อัตราขยาย 50 เท่า

3.2.3 โปรแกรมควบคุมการดึงใยแก้วแบบที่ 3 (TEST3.PRG)

โปรแกรมนี้อาจจะเหมือนกับโปรแกรม Test1.prg ดังแสดงในตารางที่ 3.4 เช่นเดียวกับโปรแกรม Test2.prg โดยจะแตกต่างกันในบรรทัดที่ 4 เป็นการเพิ่มความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สตีปิ้งมอเตอร์หยุดหมุนจาก 5 รอบต่อวินาที เป็น 7 รอบต่อวินาที เพื่อดูผลการทดลองเปรียบเทียบกับโปรแกรม Test1.prg และ Test2.prg จากการทดลองจะได้ใยแก้วนำแสงที่ดึงแล้วมีความยาวลดลงเป็น 725 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.4 โปรแกรม Test3.prg

บรรทัดที่	คำสั่ง	ตัวแปร	อธิบาย
1	O	01	การดึงครั้งที่ 1 แบบใช้ความร้อน
2	T	4	หน่วงเวลา 4 วินาที
3	A	5	หมุนด้วยความเร่ง 5 รอบต่อวินาที ²
4	V	7	ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปปีง มอเตอร์หยุดหมุน 7 รอบต่อวินาที
5	D	100	ระยะทาง 100 ชั้น
6	G		เริ่มทำงานขั้นที่ 1
7	O	00	ให้เอาท์พุท 01 หยุดส่งแรงดัน 5 โวลท์
			การดึงครั้งที่ 2 แบบไม่ใช้ความร้อน
8	A	300	หมุนด้วยความเร่ง 300 รอบต่อวินาที ²
9	V	15	ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปปีง มอเตอร์หยุดหมุน 15 รอบต่อวินาที
10	D	6250	ระยะทาง 6250 ชั้น
11	G		เริ่มทำงานขั้นที่ 2
13	S		หยุดโปรแกรม

รูปที่ 3.10 แสดงใยแก้วนำแสงที่ดึงได้ตามโปรแกรม test3.prg ที่อัตราขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าความเร็วในการดึงที่สูงให้ปลายของใยแก้วนำแสงที่แหลมกว่า แต่ถ้าความเร็วในการดึงที่ต่ำให้ปลายใยแก้วนำแสงที่ยาวกว่า แต่จากการทดลองหาขนาดของปลายโพรบที่ดึงตามโปรแกรม Test1.prg ถึง Test3.prg แล้วปรากฏว่าปลายโพรบมีขนาดใหญ่กว่า 500 นาโนเมตร ดังนั้นจึงได้ทดลองเพิ่มขึ้นในการดึงออกไปเป็น 4 ชั้น ดังโปรแกรม Test4.prg ที่มีการดึงทั้งหมด 4 ชั้นตอนด้วยกัน ในชั้นที่ 1 และที่ 2 จะเป็นการดึงให้ใยแก้วนำแสงมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลงโดยใช้ความเร็วต่ำและระยะทางที่น้อย ในชั้นที่ 3 และชั้นที่ 4 จะเป็นการดึงให้เป็นปลายแหลมด้วยความเร่งและความเร็วที่สูงขึ้น

ตารางที่ 3.5 โปรแกรม Test4.prg

บรรทัดที่	คำสั่ง	ตัวแปร	อธิบาย
1	O	1	การดึงครั้งที่ 1 แบบใช้ความร้อน
2	T	1	หน่วงเวลา 1 วินาที
3	A	5	หมุนด้วยความเร่ง 5 รอบต่อวินาที ²
4	V	0.1	ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปปีงมอเตอร์หยุดหมุน 0.1 รอบต่อวินาที
5	D	50	ระยะทาง 50 ชั้น
6	G		เริ่มทำงานชั้นที่ 1
7	O	00	ให้เอาท์พุท 01 หยุดส่งแรงดัน 5 โวลท์ การดึงครั้งที่ 2 แบบไม่ใช้ความร้อน
8	G		ด้วยพารามิเตอร์เดิม
9	O	01	การดึงครั้งที่ 3 แบบใช้ความร้อน
10	T	1	หน่วงเวลา 1 วินาที
11	G		เริ่มทำงานชั้นที่ 3
12	O	00	ให้เอาท์พุท 01 หยุดส่งแรงดัน 5 โวลท์ การดึงครั้งที่ 4 แบบไม่ใช้ความร้อน
13	D	100	ระยะทาง 100 ชั้น
14	G		เริ่มทำงานชั้นที่ 4
15	S		หยุดโปรแกรม

3.2.4 โปรแกรมควบคุมการดึงใยแก้วแบบที่ 4 (Test5.prg)

จากการหลักการข้างต้น จึงได้พัฒนาหลายมาเป็นโปรแกรม Test5.prg ดังตารางที่ 3.6 โดยในขั้นที่ 1 และขั้นที่ 2 จะเป็นการลดขนาดของใยแก้วนำแสงลงจาก 125 ไมโครเมตรลงมาเป็น 50 ไมโครเมตร ด้วยเวลาในการให้ความร้อน 1 วินาที ความแรง 5 รอบต่อวินาที² ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปป์มอเตอร์หยุดหมุน 0.1 รอบต่อวินาที และระยะทาง 50 ชั้น หรือ 315 ไมโครเมตร และผลของโปรแกรม Test5.prg เฉพาะขั้นที่ 1 และขั้นที่ 2 แสดงในรูปที่ 3.11 และหลังจากนั้นเป็นการดึงเพื่อให้ขาดออกจากกันด้วยเวลาในการให้ความร้อนนาน 1 วินาที ความแรง 50 รอบต่อวินาที² ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปป์มอเตอร์หยุดหมุน 50 รอบต่อวินาที และระยะทาง 6250 ชั้นหรือ 39.375 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และในรูปที่ 3.13 แสดงสเกลมาตรฐานใช้อ้างอิงที่ 50 เท่า แต่ละเส้นห่างกัน 10 ไมโครเมตร และในรูปที่ 3.14 แสดงขนาดของปลายโพรบใยแก้วนำแสงที่ผ่านการดึงแล้ว

ตารางที่ 3.6 โปรแกรม Test5.prg

บรรทัดที่	คำสั่ง	ตัวแปร	อธิบาย
1	O	1	การดึงครั้งที่ 1 แบบใช้ความร้อน
2	T	1	หน่วงเวลา 1 วินาที
3	A	5	หมุนด้วยความแรง 5 รอบต่อวินาที ²
4	V	0.1	ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปป์มอเตอร์หยุดหมุน 0.1 รอบต่อวินาที
5	D	50	ระยะทาง 50 ชั้น
6	G		เริ่มทำงานขั้นที่ 1
7	O	00	ให้เอาท์พุท 01 หยุดส่งแรงดัน 5 โวลต์ การดึงครั้งที่ 2 แบบไม่ใช้ความร้อน
8	G		การดึงครั้งที่ 2 แบบไม่ใช้ความร้อน
9	O	01	การดึงครั้งที่ 3 แบบใช้ความร้อน
10	T	1	หน่วงเวลา 1 วินาที
11	V	1	ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปป์มอเตอร์หยุดหมุน 1 รอบต่อวินาที
12	G		เริ่มทำงานขั้นที่ 3

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

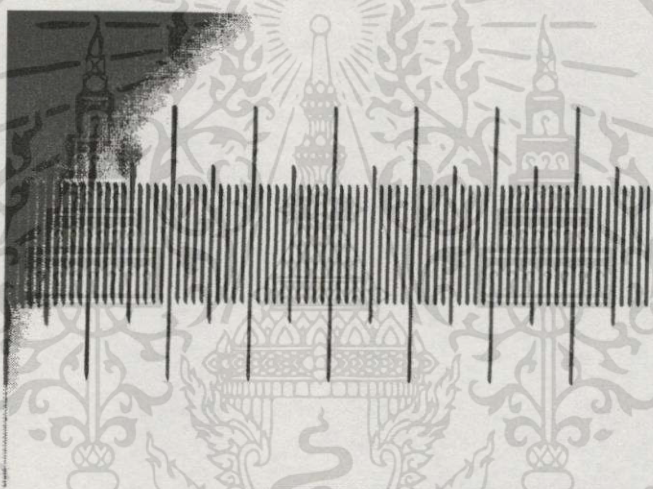
13	O	00	ให้เอาท์พุท 01 หยุดส่งแรงดัน 5 โวลท์ การดึงครั้งที่ 4 แบบไม่ใช้ความร้อน
14	A	50	หมุนด้วยความเร่ง 50 รอบต่อวินาที ²
15	V	50	ความเร็วสุดท้าย ณ เวลาที่สแต็ปปีง มอเตอร์หยุดหมุน 50 รอบต่อวินาที
16	D	6250	ระยะทาง 6250 ชั้น
17	G		เริ่มทำงานชั้นที่ 4
18	S		หยุดโปรแกรม



รูปที่ 3.11 แสดงใยแก้วนำแสงที่ดึงได้จากชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ของโปรแกรม test5.prg ที่อัตรา
ขยาย 50 เท่า



รูปที่ 3.12 แสดงใยแก้วนำแสงที่ดึงได้ตามโปรแกรม test5.prg ที่อัตราขยาย 50 เท่า



รูปที่ 3.13 แสดงสเกลมาตรฐานใช้อ้างอิงที่ 50 เท่า โดยแต่ละเส้นห่างกัน 10 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.14 แสดงขนาดของปลายใยแก้วนำแสงที่ผ่านการดึงแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การงอใยแก้วนำแสง ที่ผ่านการดึงแล้ว

การงอใยแก้วนำแสง ที่ผ่านการดึงแล้วจะทำให้ไฟฟ้าสลับแรงดันสูง ทำให้เกิดความร้อนขึ้นตรงบริเวณที่ต้องการจะงอ โดยขนาดของความร้อนจะต้องเล็กพอที่จะไม่ทำลายปลายแหลมและความร้อนเพียงพอที่จะทำให้ใยแก้วนำแสงเกิดการอ่อนตัว แล้วงอตามแรงโน้มถ่วงของโลก ถ้าลักษณะของประกายไฟที่เกิดจากการให้ความร้อนมีขนาดใหญ่เกินไป ปลายแหลมของใยแก้วนำแสง ที่เกิดจากการดึงในขั้นตอนแรกจะหลอมเหลวไป แต่ถ้าให้ความร้อนไม่เพียงพอ ปลายก็จะไม่งอ ซึ่งเวลาในการให้ความร้อน และขนาดของใยแก้วนำแสง ณ จุดที่เกิดการให้ความร้อน จะเป็นตัวกำหนดมุมงอ ต่อไปจะเป็นขั้นตอนในการงอใยแก้วนำแสง

- เลื่อนเข็มไฟฟ้าแรงดันสูงมาใกล้บริเวณที่ต้องการงอ โดยการปรับที่ฐานเบอร์ T2 (แกน X) และให้จุดที่ต้องการงอใยแก้วนำแสง อยู่ใกล้ทางด้านขั้วบวกของเข็มไฟฟ้าแรงดันสูง โดยการปรับที่ฐานเบอร์ T1 (แกน Y) เนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นที่ขั้วบวกมากกว่าและมีขนาดเล็กกว่าทางด้านลบ
- ตั้งโปรแกรมเพื่อกำหนด เวลาในการให้ความร้อน
- สั่งให้โปรแกรมทำงาน

เมื่อสั่งให้โปรแกรมทำงาน คอมพิวเตอร์จะส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS-232 ไปยังตัวควบคุมสเต็ปมอเตอร์ ซึ่งเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูงจะถูกควบคุมเวลาในการจ่ายไฟฟ้าสลับโดยตัวควบคุมสเต็ปมอเตอร์

ได้ทำการทดลองโดยเปลี่ยนค่าเวลาในการให้ความร้อน เพื่อให้ได้ใยแก้วนำแสงที่มุม 30 45 60 และ 75 องศา ดังในรูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้ความร้อนกับมุมงอของใยแก้วนำแสง โดยการทดลองงอใยแก้วนำแสงนี้ ได้ใช้ใยแก้วนำแสงที่ผ่านการดึงแล้ว 2 แบบคือแบบยาว ดังแสดงในรูปที่ 3.16 แบบ (a) ที่ความยาว 1.1 มิลลิเมตร รูปที่ 3.17 แบบ (b) ที่ความยาว 0.7 มิลลิเมตร ซึ่งใช้แบบ (a) สำหรับการงอที่มุม 75 องศาเท่านั้น และแบบ (b) สำหรับการงอที่มุม 30 45 และ 60 องศา เนื่องจากการงอใยแก้วนำแสงตรงแบบ (b) ให้ได้มุม 75 องศา จำเป็นต้องใช้ความร้อนเป็นเวลานาน ทำให้ปลายที่ดึงไว้ในขั้นตอนแรกละลายไปดังรูปที่ 3.23

ในการงอใยแก้วนำแสงที่มุมงอ 30 45 และ 60 นั้น สามารถปรับเลื่อนฐาน T1 T2 และ T3 เพื่อให้ความร้อนจากเข็มไฟฟ้าแรงดันสูงโฟกัสไปที่ใยแก้วนำแสง ตรงบริเวณช่วงที่ใยแก้วนำแสงกำลังลดขนาดลง (Taper) โดยวางใยแก้วนำแสงให้ห่างจากเข็มไฟฟ้าแรงดันสูงทาง

ข้าววกประมาณ 0.25-0.3 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดความแม่นยำจำเป็นต้องใช้กล้องขยายช่วย โดยการงอใยแก้วนำแสง 30 องศาต้องใช้เวลาประมาณ 10 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.18 การงอใยแก้วนำแสง 45 องศาต้องใช้เวลาประมาณ 15 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.19 และการงอใยแก้วนำแสง 60 องศาต้องใช้เวลาประมาณ 25 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ส่วนการให้ความร้อนที่เกิน 25 วินาที ปลายจะหลอมละลาย ดังแสดงในรูปที่ 3.23

ค่าจากตาราง 3.7 เป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง 10 ตัวอย่างต่อ 1 ช่วงเวลา เช่นในการทดลองงอใยแก้วนำแสงที่ 5 วินาที ได้ทำการทดลอง 10 ครั้งจะได้ค่าเฉลี่ยมุมองศาประมาณ 3.17 องศา และในทำนองเดียวกันกับค่ามุมองศาอื่นๆ

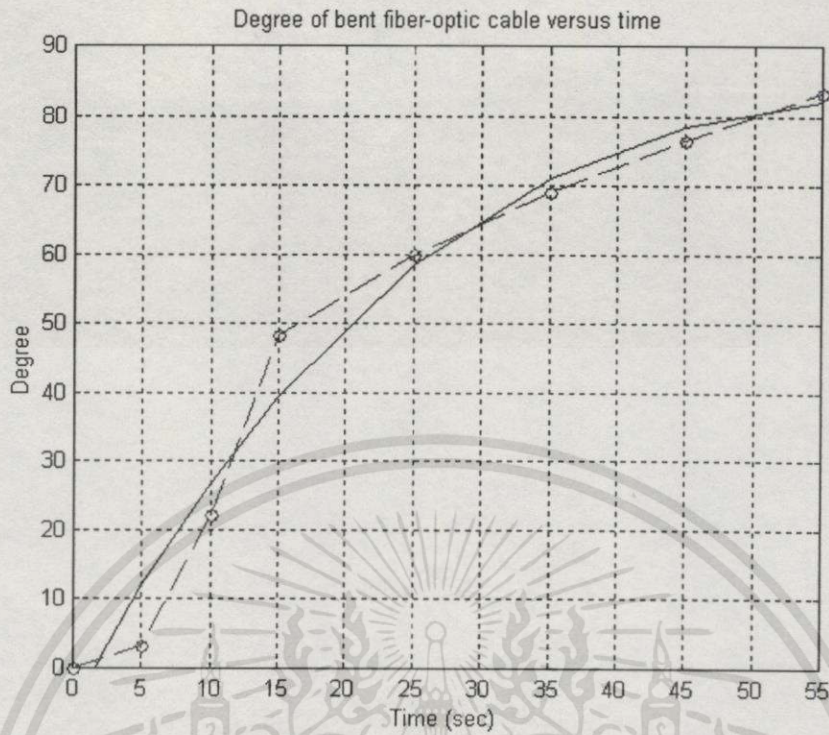
ตารางที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้ความร้อนกับค่าเฉลี่ยมุมองศาของใยแก้วนำแสง

ลำดับที่	เวลา (วินาที)	ค่าเฉลี่ยมุมองศา (องศา)	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
1	5	3.17	3	3.5
2	10	27.22	26	28.5
3	15	48.29	47.5	49
4	25	60.02	58	62
5	35	69.10	67	72
6	45	76.44	74	77
7	55	83.37	82	87

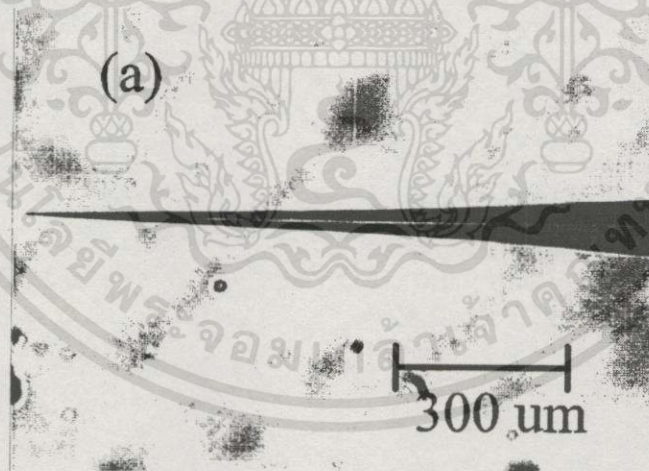
ค่าจากตารางที่ 3.7 ได้เลือกรูปแบบของสมการดังนี้

$$y = C_1 l^{-\lambda_1 t} + C_2 l^{-\lambda_2 t} \quad (3.2)$$

จากการใช้โปรแกรมแมทแลปช่วยวิเคราะห์ เพื่อให้ฟังก์ชันที่เลือกใช้ มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง จึงได้ C_1 มีค่าเท่ากับ 14,845 C_2 มีค่าเท่ากับ 14,851 λ_1 มีค่าเท่ากับ 0.0159 และ λ_2 มีค่าเท่ากับ 0.0162 โดย y แทนมุมองศาของใยแก้วนำแสง และ t แทนเวลาในการให้ความร้อน และสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้ความร้อนกับมุมองศาของใยแก้วนำแสง (องศา) และใช้ได้กับใยแก้วนำแสงที่ใช้ในการทดลองนี้เท่านั้น

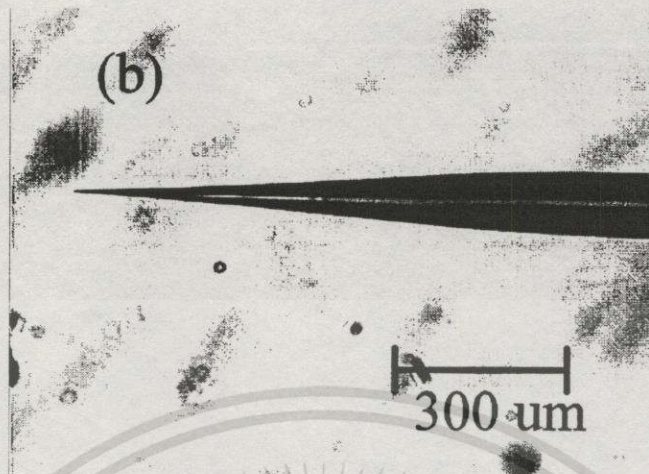


รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้ความร้อนกับมุมของใยแก้วนำแสง โดยเส้นปะ คือค่าจากการทดลอง และเส้นทึบคือค่าจากสมการที่ 3.2

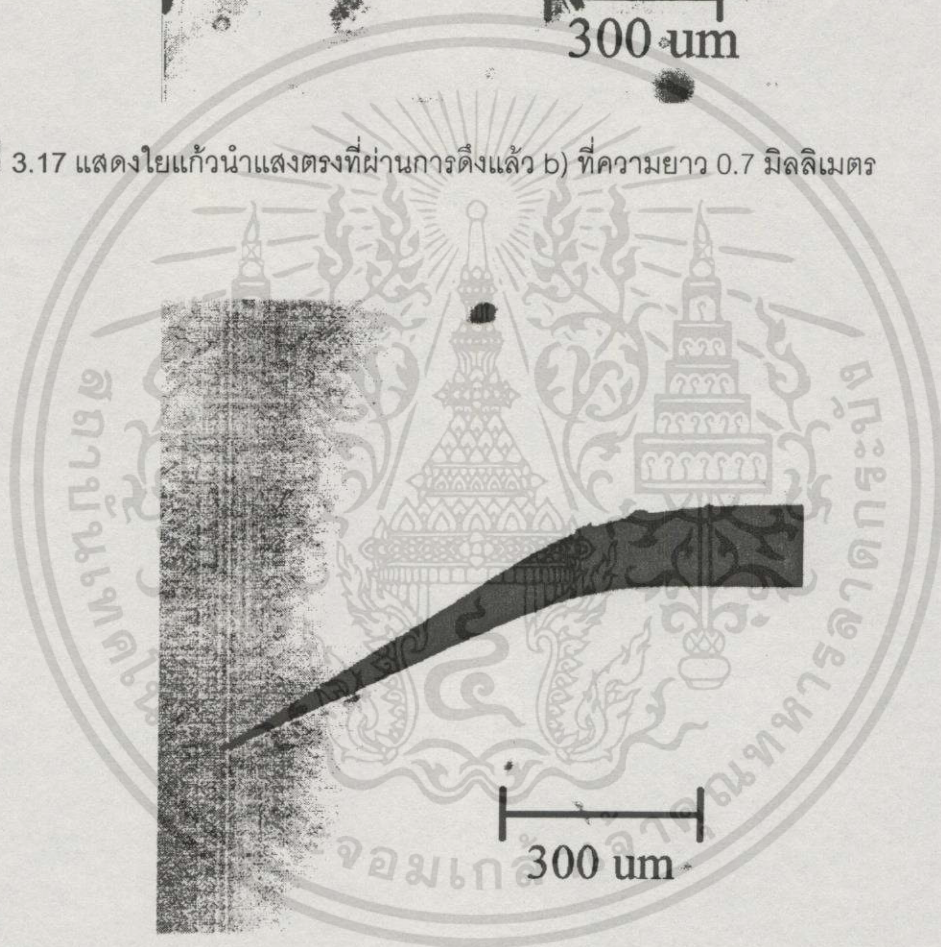


รูปที่ 3.16 แสดงใยแก้วนำแสงตรงที่ผ่านการดึงแล้ว a) ที่ความยาว 1.1 มิลลิเมตร

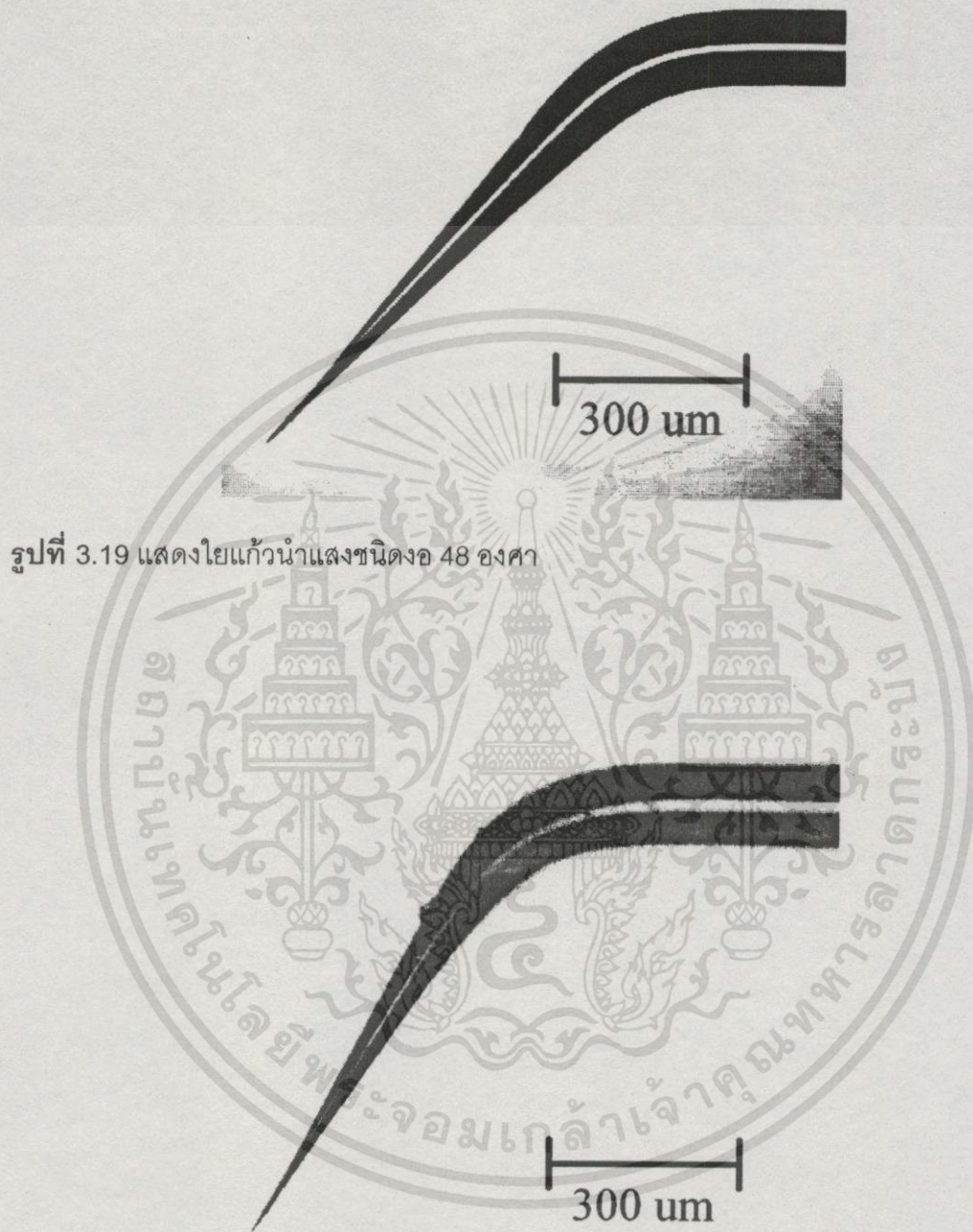
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงใยแก้วนำแสงตรงที่ผ่านการดึงแล้ว b) ที่ความยาว 0.7 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.18 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดงอ 27 องศา



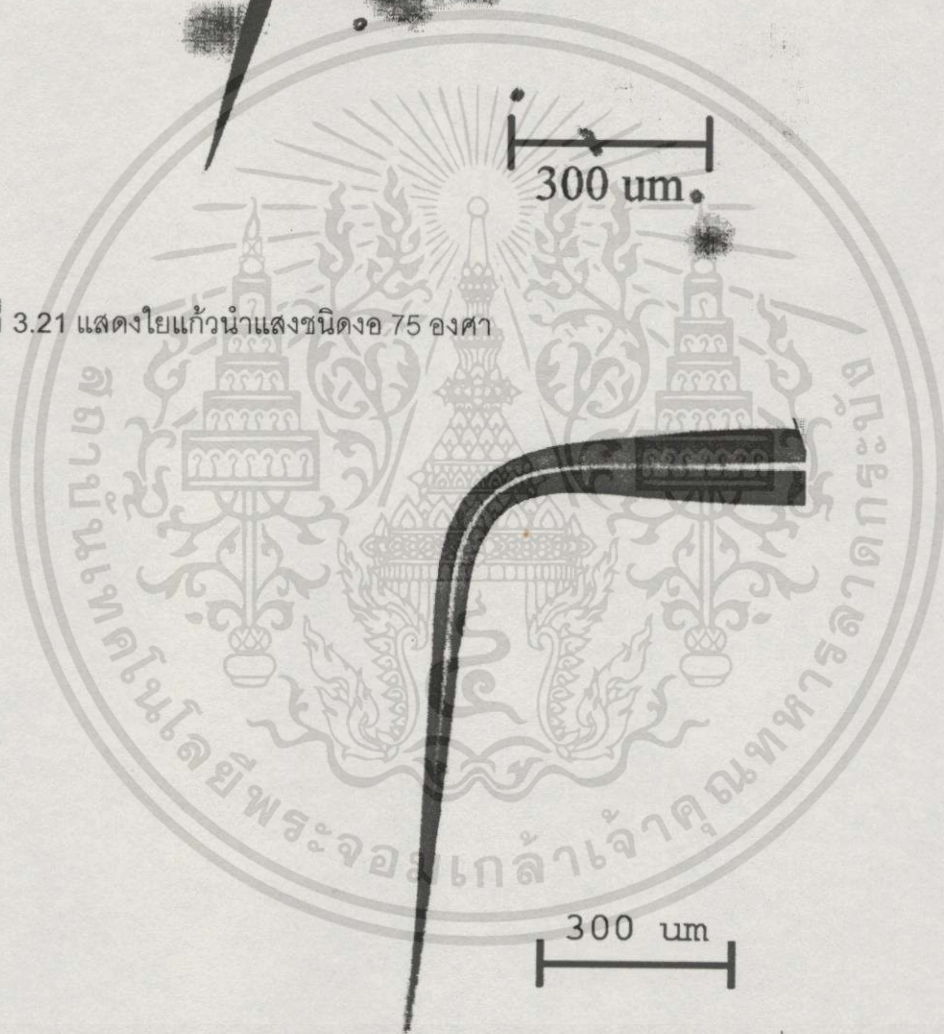
รูปที่ 3.19 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดงอ 48 องศา

รูปที่ 3.20 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดงอ 60 องศา

ส่วนการงอใยแก้วนำแสงที่มุมงอ 75 องศา นั้นใช้เวลาประมาณ 2 วินาที และมุมงอ 82 องศา นั้นใช้เวลาประมาณ 3 วินาที โดยวัดระยะจากกล้องขยายให้มีความยาวช่วงงอประมาณ 1 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22

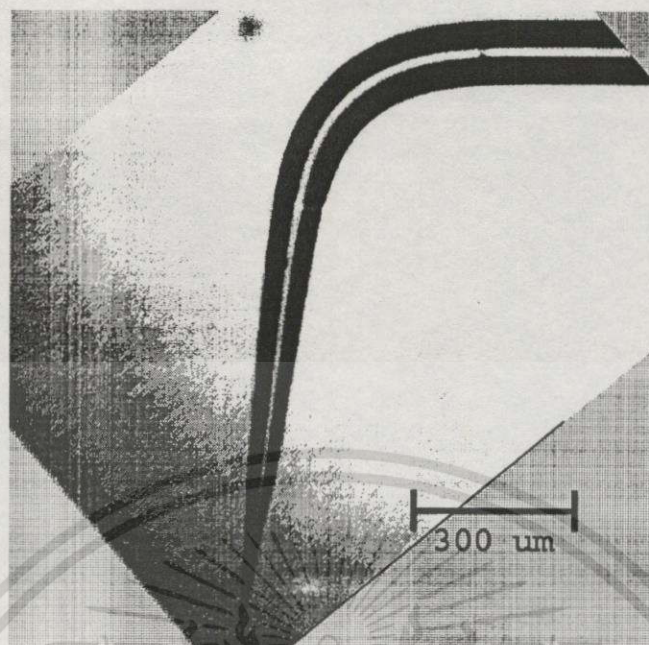
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.21 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดอ 75 องศา



รูปที่ 3.22 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดอ 82 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 แสดงใยแก้วนำแสงชนิดวง 80 องศาแต่ปลายละลาย

3.4 การเคลือบผิวของใยแก้วนำแสงด้วยทองคำ

การเคลือบผิวใยแก้วนำแสงชนิดวงด้วยทองคำ เพื่อประโยชน์ 2 อย่างคือ หนึ่ง ป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียแสง เมื่อแสงเดินทางผ่านใยแก้วนำแสงชนิดวง เนื่องจากในขั้นตอนในการงอใยแก้วนำแสง จะทำให้แสงลอดออกมาได้ (Bent loss) และสอง ใช้สะท้อนแสงเลเซอร์จากกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส เพื่อใช้ตรวจสอบการเคลื่อนที่ของใยแก้วนำแสงที่งอแล้วด้วย เหตุที่เลือกการเคลือบผิวด้วยทองคำ เนื่องจากทองคำมีค่าการสะท้อนแสงที่สูงและมีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้ง่ายต่อการทำให้เป็นไอออน อีกทั้งจะไม่เกิดสนิม (Oxide) ขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยใช้ทองคำเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ยาว 3 เซนติเมตร จะได้ความหนาที่เคลือบอยู่บนใยแก้วนำแสงประมาณ 45 ถึง 50 นาโนเมตร ต่อไปเป็นขั้นตอนในการเคลือบทองคำ

- เปิดลมและเปิดน้ำให้เข้าเครื่องเคลือบผิวด้วยไอออน ก่อนเปิดเครื่องประมาณ 5 นาที
- เปิดให้อากาศเข้าไปในห้อง (Chamber)
- หลังจากนั้นประมาณ 2-3 นาที จึงสามารถเปิดฝากระจกครอบออกได้
- นำปลายใยแก้วนำแสง งอมาวางไว้บนแท่นหมุน
- ใส่ทองคำเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรยาว 3 เซนติเมตร ลงบนอ่างเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เดินเครื่องให้ดูอากาศออกจากห้อง chamber ประมาณ 25-30 นาที หรือรอจนความดันอยู่ที่ประมาณ 0.02 บาร์
- เปิดสวิตช์มอเตอร์เพื่อให้แท่นที่วางใยแก้วนำแสง งอหมุน โดยหมุนด้วยความเร็วประมาณ 1 รอบต่อ 1 วินาที และเปิดสวิตช์ขดลวดความร้อนไฟฟ้าที่กระแสประมาณ 30 แอมป์ รอจนกระทั่งทองคำระเหยหมดจากอ่าง ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1-2 นาที
- ปิดสวิตช์มอเตอร์และสวิตช์ขดลวดความร้อน
- รอจนขดลวดความร้อนเย็นตัวลง จึงเปิดให้อากาศเข้า
- หลังจากนั้นประมาณ 2-3 นาที จึงสามารถเปิดฝากระจกครอบออกได้

การเคลือบผิวของใยแก้วนำแสงชนิดงอด้วยทองคำ เพื่อให้เป็นโพรบชนิดงอ ด้วยการเคลือบทองคำหนาประมาณ 45 ถึง 50 นาโนเมตร สามารถทำการเคลือบผิวใยแก้วนำแสงไม่ให้แสงลอดออกมาได้ ซึ่งทุกๆ ด้านของโพรบชนิดงอจะถูกเคลือบด้วยทองคำหนาประมาณ 45 ถึง 50 นาโนเมตร

3.5 การยึดใยแก้วนำแสงชนิดงอเข้ากับฐานอลูมิเนียม เพื่อทำเป็นแคนทิลิเวอร์

จากหลักการการทำงานและตัวอย่างของแคนทิลิเวอร์ (Cantilever) ที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส ในโหมดสลับผัดในบทที่ 2 โพรบชนิดงอจะต้องสั่น (Oscillate) ที่ความถี่กำร (Resonant) ซึ่งก็คือมวลหรือน้ำหนักของฐานกับน้ำหนักของใยแก้วนำแสงชนิดงอรวมกันเป็น m ตามสมการที่ 3.1 เนื่องจากมวลของโพรบชนิดงออย่างเดียวมีค่าน้อยมาก

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{kx}{m} = \frac{F_o}{m} \cos \omega t \quad (3.1)$$

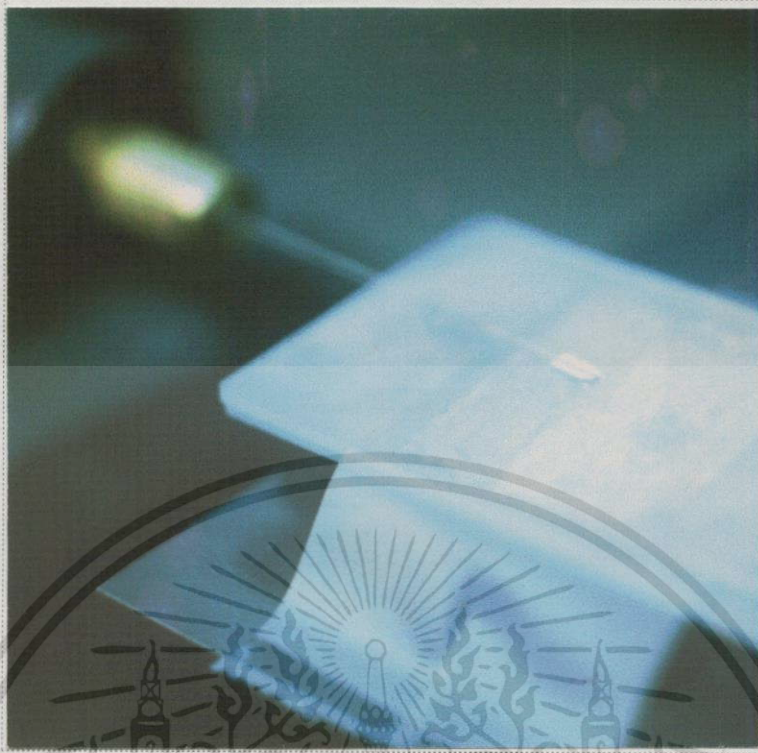
เพื่อความสะดวกในการติดตั้งเข้ากับตัวยึดใยแก้วนำแสง (Optical fiber holder) จึงจำเป็นต้องมีฐานอลูมิเนียม ขนาด $3.5 \times 1.5 \times 0.5$ มิลลิเมตร³ และมีร่องตรงกลางลึก 0.2 มิลลิเมตร เพื่อให้วางใยแก้วนำแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.24 และแสดงวิธีการติดตั้งใยแก้วนำแสงกับฐานอลูมิเนียมด้วยเครื่องมือที่ประกอบขึ้นในห้องปฏิบัติการอย่างง่ายๆ ประกอบขึ้นจากตัวจับยึดใยแก้วนำแสงเพื่อใช้ในการ launch แสงเลเซอร์ และตัวแท่นที่สามารถปรับขึ้นลงและเข้า

ออกได้ ซึ่งทำให้การยึดติดตั้งฐานอลูมิเนียมเข้ากับใยแก้วนำแสงชนิดงอเป็นไปโดยง่ายและ
แม่นยำ ดังในรูปที่ 3.25 รูปที่ 3.26 และรูปที่ 3.27 แสดงโพรบชนิดงอที่ติดตั้งฐานอลูมิเนียม
เรียบร้อยแล้วพร้อมใช้งาน ต่อไปเป็นขั้นตอนในยึดใยแก้วนำแสงชนิดงอเข้ากับฐานอลูมิเนียม

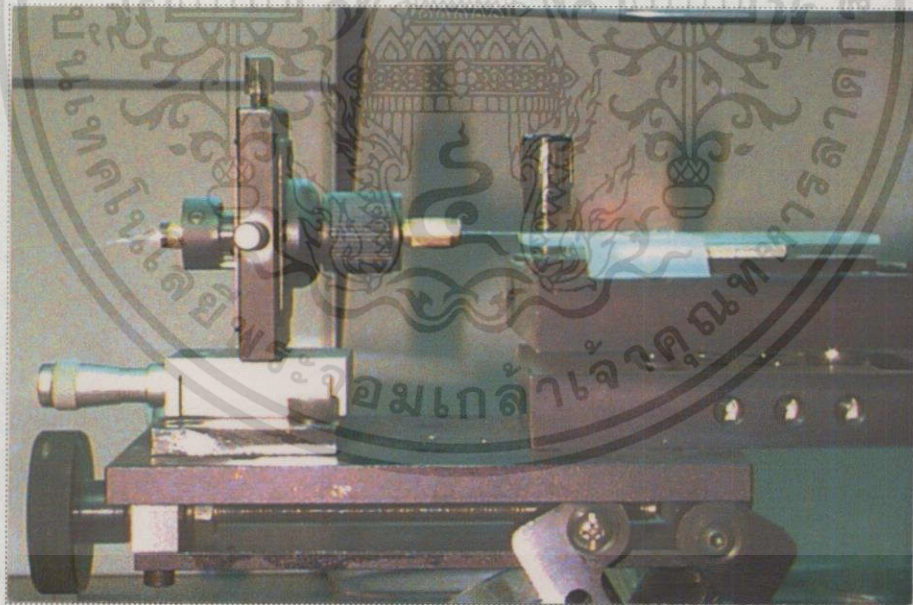
- วางใยแก้วนำแสงชนิดงอให้หงายปลายแหลมขึ้น โดยวางฐานอลูมิเนียมหงายด้าน
ที่มีร่องขึ้น
- หลังจากนั้นจึงปรับตัวจับยึดใยแก้วนำแสง ให้ตัวใยแก้วนำแสงชนิดงอเคลื่อนที่ลง
มาชนกับร่องของฐานอลูมิเนียม โดยวางให้ใยแก้วนำแสงชนิดงอยื่นออกมาจาก
ฐานราว 10 มิลลิเมตร
- ใช้กาบแบบแห้งเร็วยึดใยแก้วนำแสง เข้ากับฐานอลูมิเนียม โดยให้จุดทิ้งของใย
แก้วนำแสงชนิดงอ อยู่ห่างจากขอบฐานประมาณ 10 มิลลิเมตร
- รอจนกระทั่งกาบแห้งสนิทประมาณ 3-4 ชั่วโมง



รูปที่ 3.24 แสดงฐานอลูมิเนียมขนาด $3.5 \times 1.5 \times 0.5$ มิลลิเมตร³



รูปที่ 3.25 แสดงการติดตั้งโพรบชนิดงอบบนฐานอลูมิเนียม โดยมองจากด้านบน



รูปที่ 3.26 แสดงการติดตั้งโพรบชนิดงอบบนฐานอลูมิเนียม โดยมองจากด้านข้าง

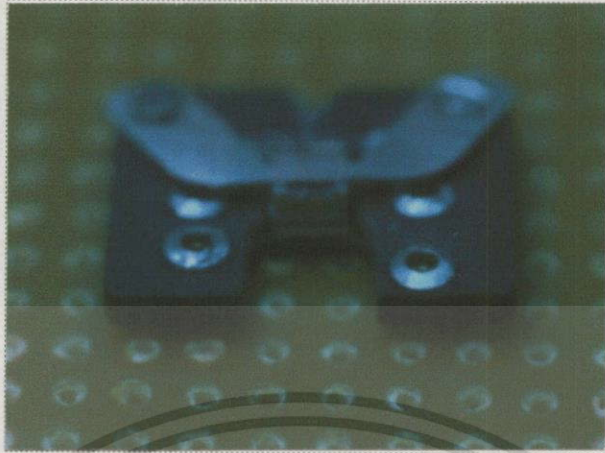
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.27 แสดงโพรบชนิดงอติดตั้งบนฐานอลูมิเนียม หรือแกนทิลเลอร์ด้วยการยึดด้วยกาว

3.6 การติดตั้งแกนทิลเลอร์เข้ากับตัวยึดโพรบชนิดงอ (Bent probe holder)

การติดตั้งจะใช้ตัวจับยึดที่ให้มากับกล่องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส ดังแสดงในรูปที่ 3.28 ซึ่งที่ตัวจับยึดนี้จะมีเปียโซ (Piezo electric) ติดตั้งอยู่แล้ว เพื่อโพรบจะสามารถล้นได้ที่ความถี่ก้ำกักร โดยความถี่และแอมพลิจูดจะถูกกำหนดจากตัวโปรแกรมของกล่องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส ซึ่งความถี่ก้ำกักรของโพรบแต่ละอันจะไม่เท่ากัน และขึ้นอยู่กับน้ำหนักของฐานอลูมิเนียม การติดตั้ง ซึ่งความถี่ในการล้นไม่มีผลต่อความละเอียดของภาพ

การติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.29 และรูปที่ 3.30 โดยการถอดสลักที่เห็นในรูปที่ 3.29 ทั้ง 2 ตัวออกก่อน เพื่อคลายเหล็กรูปตัวยู แล้วจึงวางแกนทิลเลอร์ไว้ตรงร่องขนาดเท่ากับฐานอลูมิเนียมไว้ตรงกลาง ด้วยความระมัดระวัง แล้วจึงค่อยๆ ขันสลักยึดเหล็กรูปตัวยู เพื่อยึดแกนทิลเลอร์ไว้ ดังแสดงภาพขยายในรูปที่ 3.30 โดยระหว่างที่ขันสลัก ต้องพยายามที่จะให้แกนทิลเลอร์วางอยู่กลางร่องพอดี

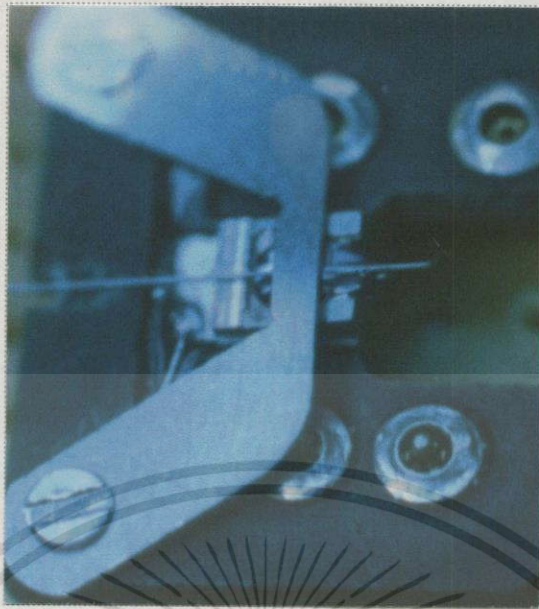


รูปที่ 3.28 ตัวอย่างตัวจับยึดที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอลด



รูปที่ 3.29 แสดงการติดตั้งแคนทิลิเวอร์กับตัวยึดโพรบชนิดงอ

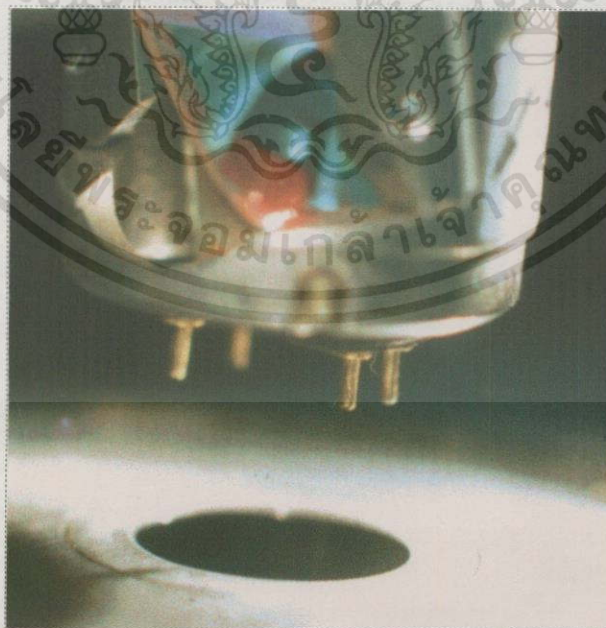
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 แสดงภาพขยายของแคนทีลเลอร์กับตัวยึดโพรบชนิดงอ

3.7 การติดตั้งตัวยึดโพรบชนิดงอเข้ากับกล่องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส

การติดตั้งตัวยึดโพรบชนิดงอเข้ากับกล่องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสนั้น สามารถทำได้ อย่างสะดวกและง่าย ดังแสดงในรูปที่ 3.31 และ 3.32 โดยขั้วไฟฟ้านั้น 4 ขั้ว ใช้ทั้งในการส่งแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้เป็ยโซลัน และใช้เป็นที่จับยึดของตัวยึดโพรบชนิดงอ เนื่องจากขั้วทั้ง 4 นั้นมี เหล็กสปริงอยู่ภายใน โดยในขั้นตอนแรกต้องทำการยกสแกนเนอร์ให้สูงที่สุดก่อน ด้วยการให้



รูปที่ 3.31 แสดงหัวสแกนเนอร์ของกล่องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสั่ง Lift up เพื่อให้สะดวกต่อการใส่ตัวยึดโพรบ หลังจากนั้นจึงทำการคว่ำตัวยึดโพรบ ให้ปลายโพรบใยแก้วนำแสงชี้ลง และสวมให้ตรงกับขาทั้ง 4 ของสแกนเนอร์ที่ยื่นออกมา



รูปที่ 3.32 แสดงหัวสแกนเนอร์ของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส เมื่อใส่ตัวยึดโพรบชนิดงอ

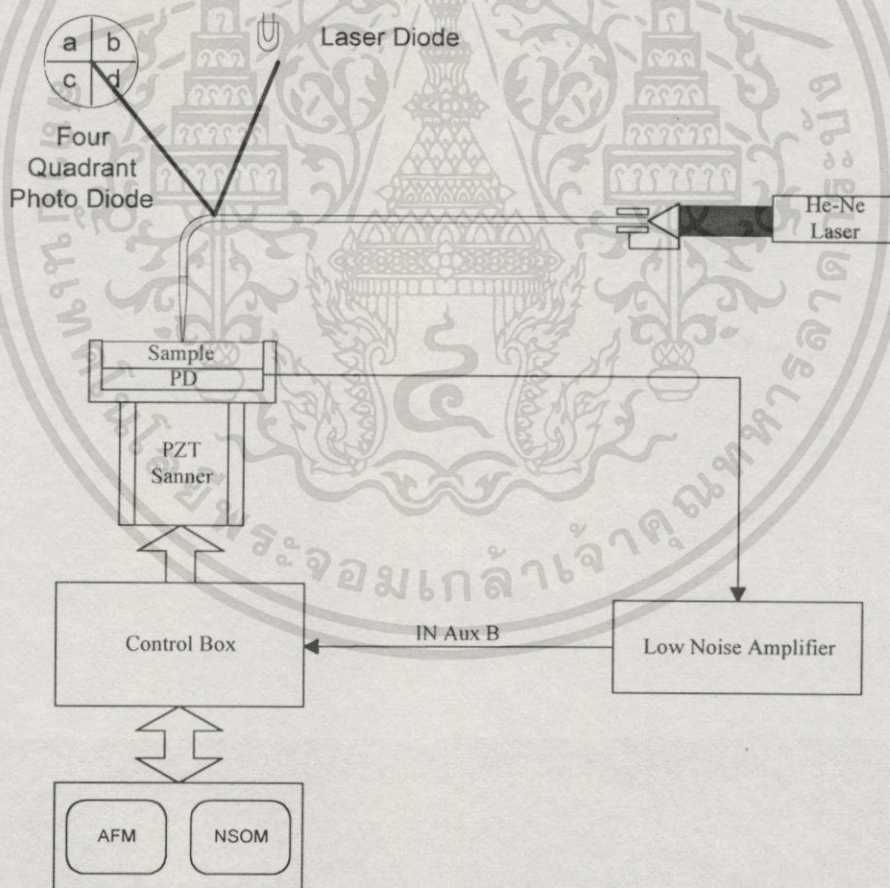
3.8 การปฏิบัติการบนกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส

จากพื้นฐานในบทที่ 2 เรื่องกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส โพรบชนิดงอจะทำงานในโหมดตะเตะ เนื่องจากโพรบชนิดงอที่ใช้มีขนาดเล็กมาก การทำงานในโหมดลัมผัส อาจเป็นการทำลายปลายของโพรบได้ ส่วนการปฏิบัติการในแบบ near-field นี้ เป็นการเลือกใช้แบบ transmission mode ซึ่งให้ภาพที่สว่างกว่าและปฏิบัติการง่ายกว่า ดังแสดงในรูปที่ 3.33 ซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกเป็นขั้นตอน ดังนี้

- ทำการ Launch แสง HeNe เลเซอร์เข้าไปที่ปลายอีกด้านหนึ่งของโพรบชนิดงอ
- วางตัวอย่างแบบโปร่งแสงไว้บนโฟโตไดโอด
- เอาท์พุทจากโฟโตไดโอดจะป้อนเข้าไปที่เครื่องขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำ
- เปิดกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส ให้เป็นการทำงานในแบบ transmission mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใยแก้วนำแสงไฟเบอร์นำเข้าไปที่กล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอล แสดงในรูปที่ 3.32
- ไฟกัลแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการควบคุมการขึ้นลงของโพรบชนิดอ บนหลังของแคนทิลิเวอร์แสดงในรูปที่ 3.34
- หาความถี่ในการสั่น (Oscillate) ที่มียอดสูงสุด (ความถี่ก้ำกร) โดยความถี่ในการสั่นจะอยู่ในช่วง 100-1,000 กิโลเฮิร์ต
- กำหนดขนาดของรูปภาพ (Scan size) เช่น 10 x 10 ไมโครเมตร หรือ 5 x 5 ไมโครเมตร
- กำหนดช่วงสูงสุดของการกวาดภาพ (Z limit)
- ทำการ Engage โดยโพรบจะค่อยๆ เคลื่อนที่ลงไปหาตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.36 และเมื่อปลายโพรบชนิดอสัมผัสกับพื้นผิวของตัวอย่างแล้ว กล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอล ก็จะทำการเก็บภาพ



รูปที่ 3.33 ไดอะแกรมของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบ near-field ในแบบทรานสมิตชันใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปฏิบัติการนี้ จะเหมือนกับการปฏิบัติบนกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส เพื่อให้ได้ภาพภูมิประเทศ ทั่วๆ ไป แต่จะมีการเพิ่มอินพุทจากโฟโตไดโอดเข้าไป เพื่อให้ได้ภาพเชิงแสงเพิ่มขึ้นอีก โดยก่อนที่จะป้อนเอาท์พุทจากโฟโตไดโอดไปยังอินพุทของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส จะต้องทำการขยายสัญญาณก่อน โดยใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ แล้วจึงป้อนเข้าไปที่ส่วนอินพุทกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส เพื่อแสดงผลต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.33

การตรวจสอบการเคลื่อนที่ของโพรบชนิดงอ จะอาศัยแสงจากเลเซอร์ไดโอด สะท้อนจากหลังของแคนทิลีเวอร์ไปยังโฟโตไดโอดแบบ 4 ส่วน (Four quadrant photodiode) โดยในสภาวะเริ่มต้น เราจะโฟกัสแสงไปยังจุดกึ่งกลางของโฟโตไดโอดแบบ 4 ส่วนก่อน เมื่อโพรบชนิดงอเคลื่อนที่ขึ้น แสงก็จะไปตกกระทบบริเวณ C และ D มากกว่าส่วน A และ B และในทำนองเดียวกันเมื่อโพรบชนิดงอเคลื่อนที่ลง แสงก็จะไปตกกระทบบริเวณ A และ B มากกว่าส่วน C และ D



รูปที่ 3.34 แสดงแสงเลเซอร์ที่โฟกัสลงบนโพรบชนิดงอ



รูปที่ 3.35 แสดงภาพขยายของเลเซอร์ที่โฟกัสลงบนโพรบชนิดงอ



รูปที่ 3.36 แสดงโพรบชนิดงอกำลังเข้าใกล้ตัวอย่าง

3.9 สรุป

จากขั้นตอนดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ ตั้งแต่การออกแบบและการสร้างเครื่องดึงใยแก้วนำแสง ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้าสลัปลำแสงแรงดันสูง เครื่องกลสำหรับจับยึดใยแก้วนำแสง และส่วนของตัวควบคุมสเต็ปมอเตอร์ เพื่อใช้ในการดึง และการงอ ต่อมาเป็นการเคลือบใยแก้วนำแสงด้วยทองคำ เพื่อปกป้องแสงเลเซอร์ไว้ไม่ให้เกิดการรั่วออกมา ซึ่งจบจากขั้นตอนนี้ก็ยังสามารถทำการผลิตโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอแบบ near-field ที่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการอาร์กด้วยไฟฟ้า หลังจากนั้นจะเป็นการติดตั้งใยแก้วนำแสงชนิดงอบนฐานอลูมิเนียม และการติดตั้งแคนทิลิวเวอร์เข้ากับกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทนี้อย่างครบถ้วน และต่อไปจะเป็นการนำโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอแบบ near-field ไปใช้ในบทที่ 4 ในเรื่องการทดลองและผลการทดลองต่อไป

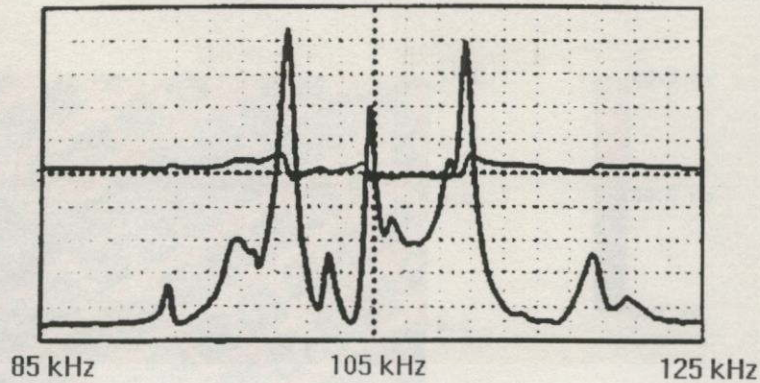
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของผลการทดลองที่ได้จากโพรบใยแก้วนำแสงชนิดอ โดยในขั้นแรกจะเปรียบเทียบความละเอียด ระหว่างโพรบซิลิกอนมาตรฐานของกล้องจุลทรรศน์ อะตอมมิกฟอสกับโพรบที่ทำจากเส้นใยนำแสง โดยใช้เกรตติงขนาดความกว้าง 1 ไมโครเมตร ในขั้นที่สอง จะทดลองกับโมเลกุลของโพลิเมอร์ขนาด 500 นาโนเมตร เป็นตัวอ้างอิง และรวมทั้งการทดลองหาภาพเชิงแสงจากตัวอย่างโพลิเมอร์ขนาด 500 นาโนเมตร ด้วย ตลอดจนการ อธิบายผลสรุปจากการทดลอง

โพรบใยแก้วนำแสงอที่เลือกใช้ในผลการทดลองนี้ เป็นโพรบใยแก้วนำแสงอแบบ 60 องศาเท่านั้น เนื่องจากในโพรบใยแก้วนำแสงอแบบอื่นๆ ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ โดย โพรบใยแก้วนำแสงอแบบที่น้อยกว่า 60 องศา จะได้ภาพที่ไม่ดี เนื่องจากขนาดของปลายโพรบมีขนาดใหญ่ เพราะขนาดของปลายโพรบโดยรวมจะเป็นขนาดของปลายโพรบจริงบวกกับ ด้านข้างของโพรบด้วย ส่วนโพรบใยแก้วนำแสงอที่มากกว่า 60 องศาจะไม่สามารถใช้งาน ในการทำงานแบบเชิงแสงได้ เนื่องจากแสงที่ออกมาที่ปลายมีกำลังต่ำมาก จนไม่สามารถ ปฏิบัติการในแบบ near-field ได้ และเมื่อพยายามเพิ่มกำลังของแสงเลเซอร์ขึ้น ปลายของโพรบ ใยแก้วนำแสงอก็เกิดความร้อนและหลอมละลายไป อันเนื่องมาจากแสงเลเซอร์ จนไม่สามารถ นำมาใช้งานได้ เหตุที่โพรบใยแก้วนำแสงอแบบที่มากกว่า 60 องศา มีการสูญเสียกำลังที่ มากกว่าแบบอื่น อาจจะเป็นเพราะว่าเป็นการงอโพรบตรงบริเวณที่กำลังคอดลง ทำให้เกิดการ สูญเสียแสงมากบริเวณนั้น

เมื่อทำการติดตั้งตัวยึดโพรบชนิดอเข้ากับกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสเรียบร้อยแล้ว ตามขั้นตอนที่ 3.7 ในขั้นตอนก่อนการปฏิบัติการเพื่อให้ได้ภาพภูมิประเทศ จะเป็นทำให้โพรบใย แก้วนำแสงชนิดอสั้นที่มีความดีก่าธร เพื่อหาความดีที่โพรบสามารถสั้นได้ดีที่สุด เพราะเนื่องจากการ ทำงานในโหมดแต่ะในบทที่ 2.7.2 โดยใช้ฟังก์ชันที่มีอยู่แล้วในกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิก ฟอส จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยความดีก่าธรของแต่ละโพรบจะไม่เท่ากัน และความดี สูงหรือต่ำ ไม่มีนัยสำคัญต่อความละเอียดของภาพ



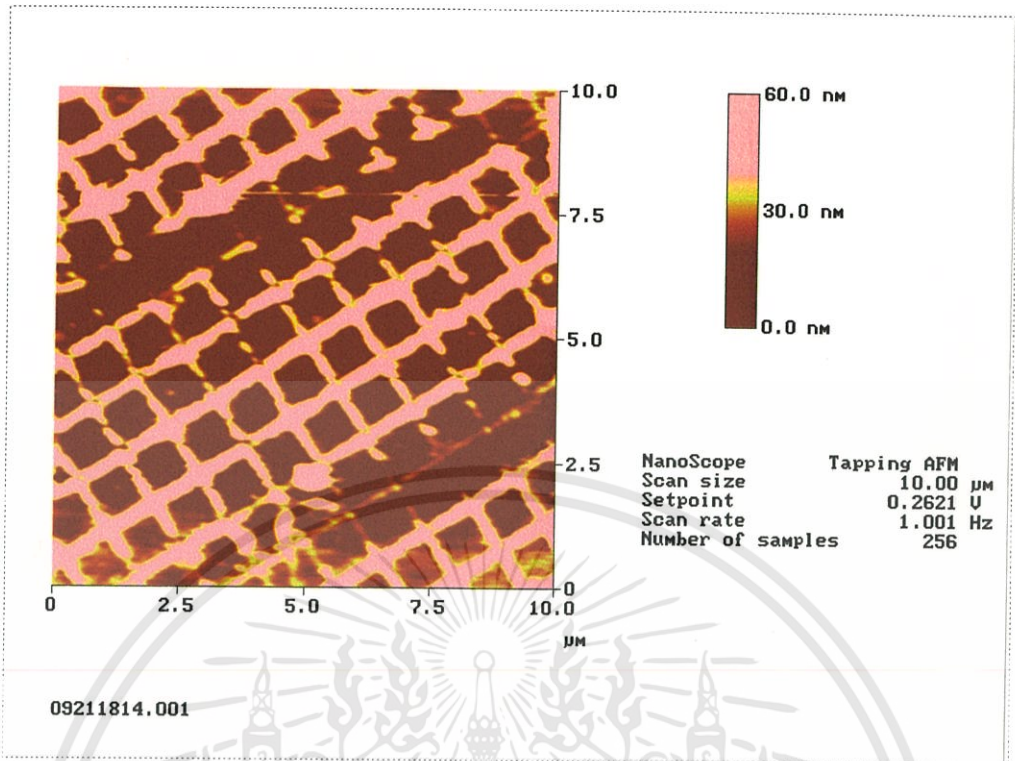
รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างความถี่กำลังของใยไฟเบอร์นำแสงชนิดอ

4.1 การทดลองหาภาพภูมิประเทศของใยไฟเบอร์นำแสงชนิดอกับเกรต ดิงขนาด 1 ไมโครเมตร

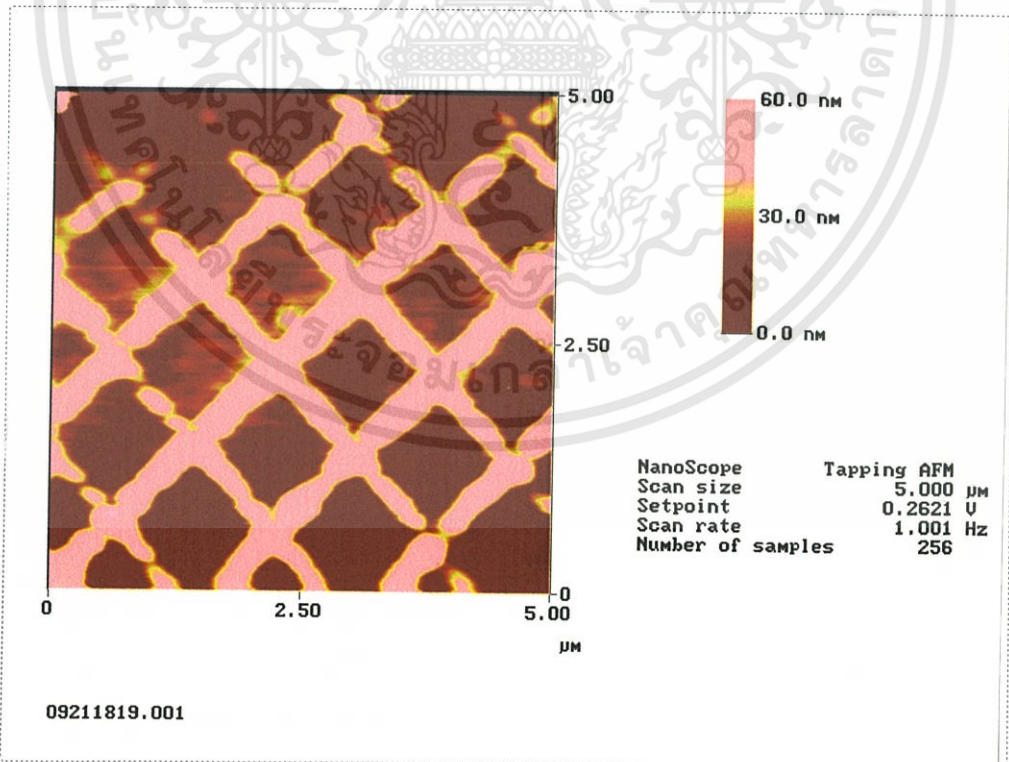
การทดลองนี้ ทำเพื่อใช้วัดขนาดปลายของใยไฟเบอร์นำแสงชนิดอที่สร้างขึ้นโดยใช้ตัวอย่างที่เป็นเกรตดิงขนาดช่องว่างระหว่างเส้นเกรตดิงเท่ากับ 1 ไมโครเมตร ขนาดของเส้นเกรตดิงมีขนาดประมาณ 1 นาโนเมตร เมื่อใช้ใยที่ขนาดใหญ่กว่า 1 นาโนเมตร ภาพภูมิประเทศที่ได้ก็คือขนาดของปลายใยที่ใช้ เนื่องจากขนาดของใยมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นมาก

ในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.4 จะเป็นการทดลองโดยใช้ใยบงอที่สร้างขึ้นจากบทที่ 3 มาทำการกวาดบนเกรตดิง ที่มีระยะห่างระหว่างเส้นเท่ากับ 1 ไมโครเมตร จะเห็นว่ามีใยบงอมีขนาดที่ปลายประมาณ 200 ถึง 250 นาโนเมตร

ภาพที่ได้จากการทดลองนี้จะเป็นภาพภูมิประเทศ โดยในรูปที่ 4.1 เป็นภาพภูมิประเทศขนาด 10 x 10 ตารางไมโครเมตร รูปที่ 4.2 เป็นภาพภูมิประเทศขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตร รูปที่ 4.3 เป็นภาพภูมิประเทศขนาด 3 x 3 ตารางไมโครเมตร และรูปที่ 4.4 เป็นภาพภูมิประเทศขนาด 2 x 2 ตารางไมโครเมตร ระดับของสีแทนความสูงของพื้นผิว โดยสีดำคือระดับพื้น (Ground) สีเทาคือความสูงที่ 30 นาโนเมตร และสีขาวคือความสูงที่ 60 นาโนเมตร

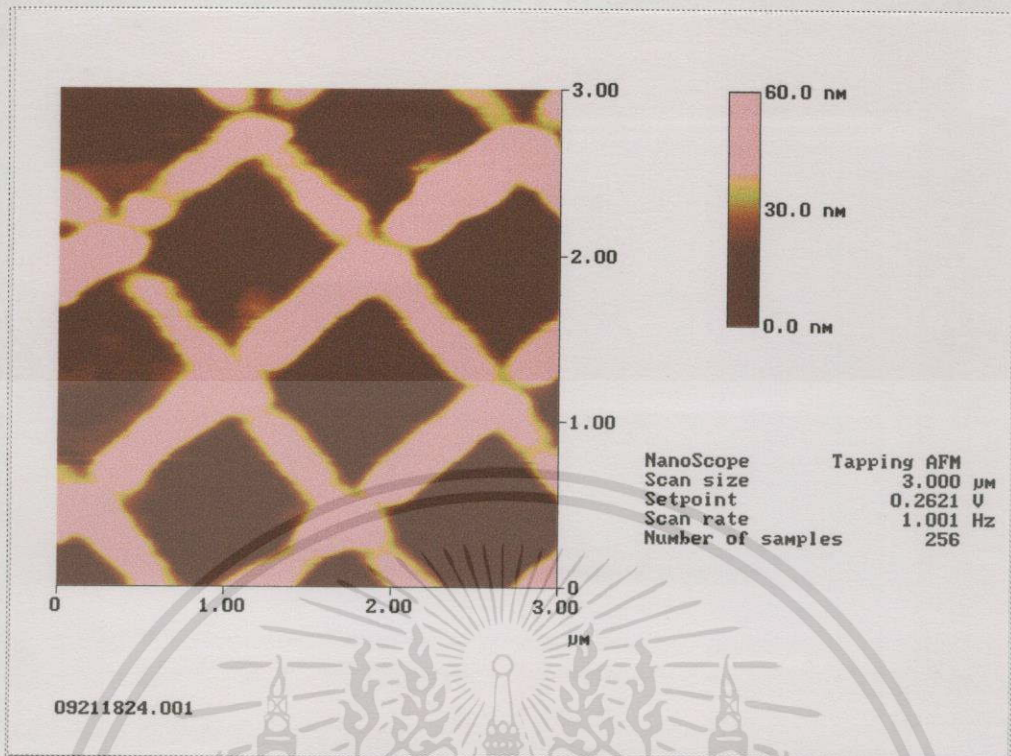


รูปที่ 4.2 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตร ขนาด 10 x 10 ตารางไมโครเมตร จากโพรมิไค้วนำแสงชนิดอ



รูปที่ 4.3 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตร ขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตรจากโพรมิไค้วนำแสงชนิดอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

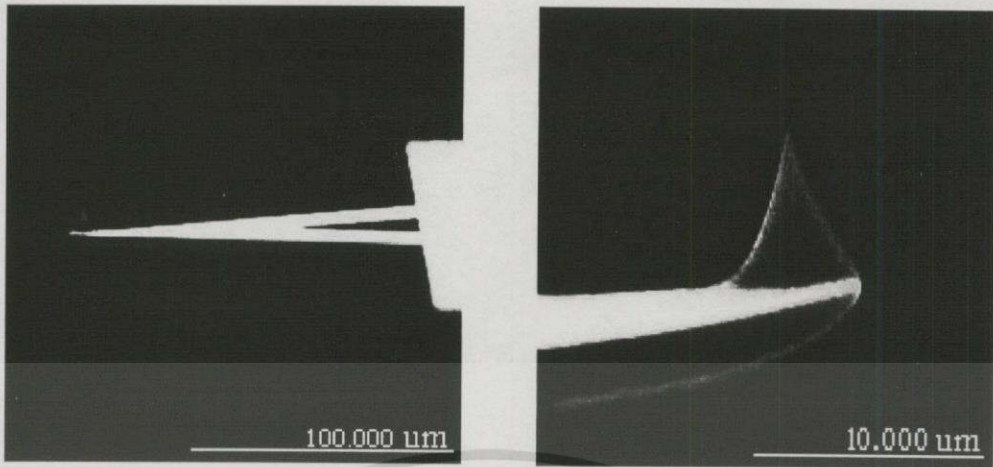


รูปที่ 4.4 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตร ขนาด 3 x 3 ตารางไมโครเมตรจากโพรมบไยแก้วนำแสงชนิดอ

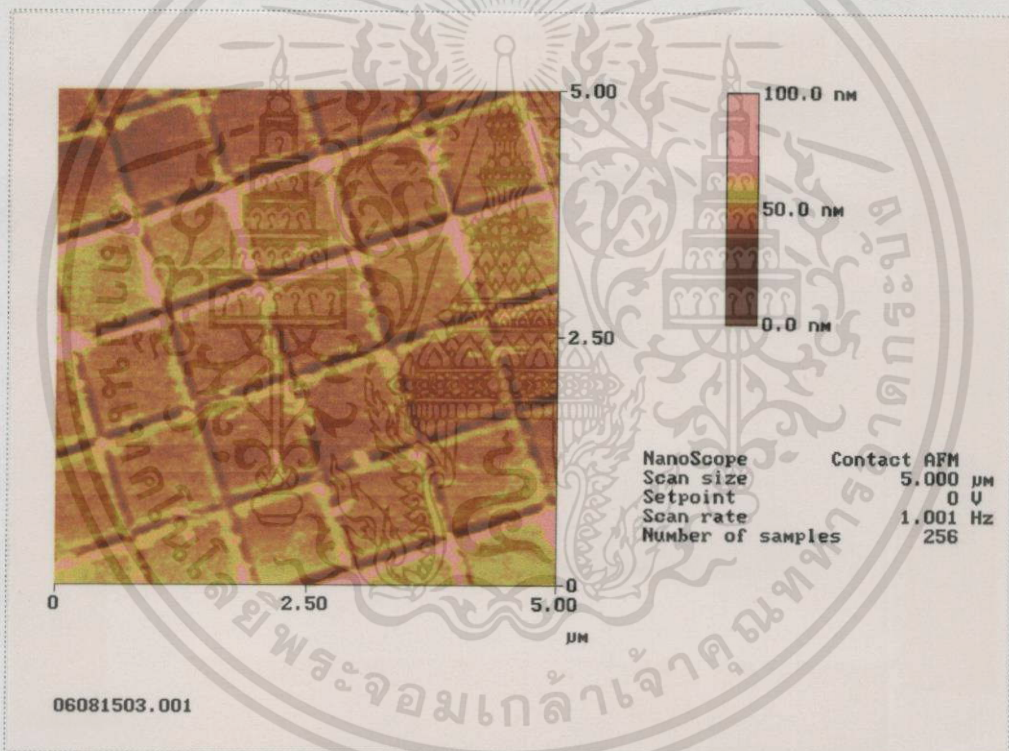


รูปที่ 4.5 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตร ขนาด 2 x 2 ตารางไมโครเมตรจากโพรมบไยแก้วนำแสงชนิดอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

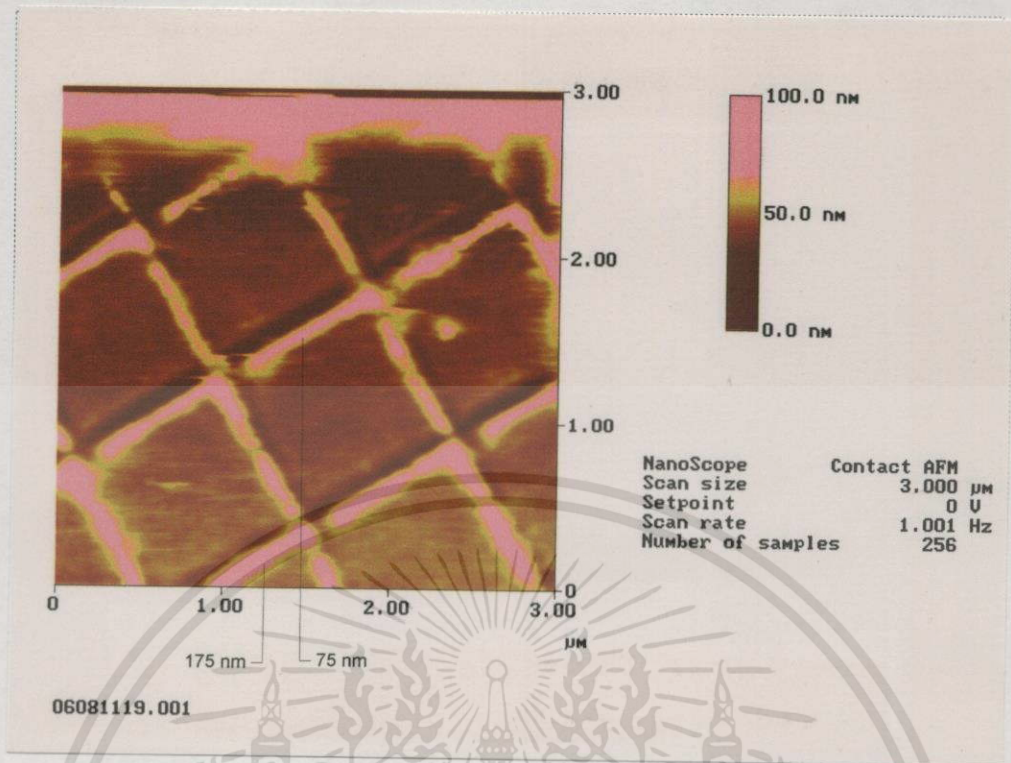


รูปที่ 4.6 แสดงโพรบซิลิกอนมาตรฐาน



รูปที่ 4.7 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตรขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตร จากโพรบซิลิกอนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงภาพภูมิประเทศของเกรตติง 1 ไมโครเมตรขนาด 3 x 3 ตารางไมโครเมตร จากโพรบซิลิกอนมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าขนาดของเส้นที่หัวโพรบใยแก้วนำแสงวัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 175 นาโนเมตร ถึง 350 นาโนเมตร และจากรูปที่ 4.8 ขนาดของเส้นที่หัวโพรบซิลิกอนมาตรฐานวัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 75 นาโนเมตร ถึง 175 นาโนเมตร และเมื่อเปรียบเทียบรูปภูมิประเทศที่ได้จากโพรบใยแก้วนำแสงกับรูปที่ได้จากโพรบซิลิกอนมาตรฐานของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า เส้นเกรตติงที่ได้จากหัวโพรบซิลิกอนมาตรฐานมีขนาดเล็กกว่าเส้นเกรตติงที่ได้จากโพรบใยแก้วนำแสง และในรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของโพรบซิลิกอนมาตรฐาน

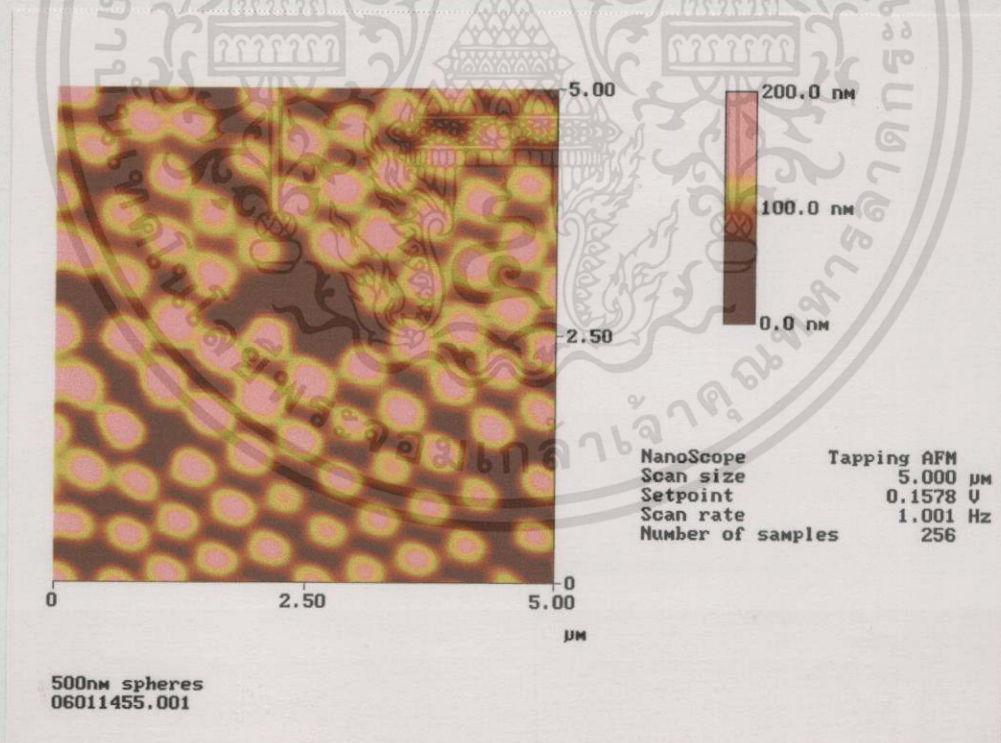
4.2 การทดลองหาภาพภูมิประเทศของโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอกกับโมเลกุลโพลิเมอร์ขนาด 500 นาโนเมตร

ในการทดลองนี้ จำเป็นที่จะต้องมีการเตรียมตัวอย่างโพลิเมอร์ก่อน ซึ่งโพลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้จะละลายอยู่ในของเหลวใส เป็นโพลิเมอร์บริสุทธิ์ที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมเจือปน และของเหลวใสนี้จะระเหยไปเมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง จนเหลือแต่โมเลกุลของโพลิเมอร์ โดยปกติโพลิเมอร์จะถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส ต่อไปนี้จะเป็นขั้นตอนในการเตรียมโพลิเมอร์

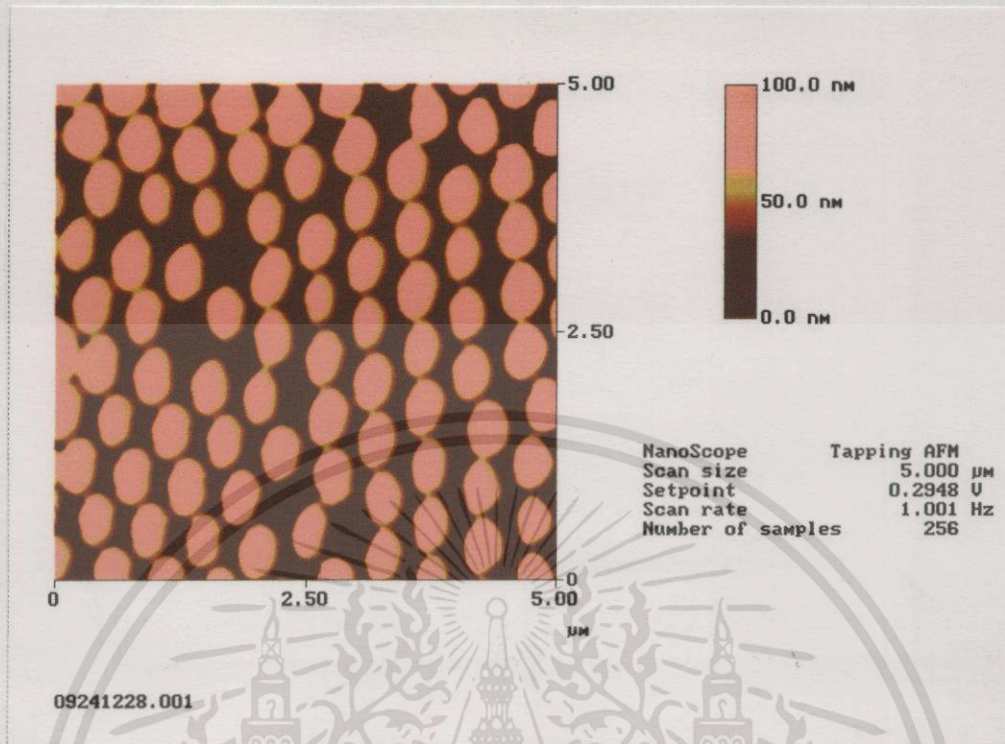
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้างสไลด์ 2 แผ่นในเครื่องล้างอุลตราโซนิก 1 นาทีในของเหลวที่เป็นแอลกอฮอล์
- รอจนแผ่นสไลด์แห้ง
- ดูดตัวอย่างจากขวดโดยใช้หลอดดูด ประมาณ 0.25 ซีซี เทลงบนสไลด์แผ่น
- นำสไลด์แผ่นที่ 2 ประกบ แล้วค่อยๆ เลื่อนแผ่นบนออก เพื่อให้ตัวอย่างเรียบ
- นำสไลด์แผ่นบนและล่างไปไว้ในตู้กันฝุ่น
- รอจนตัวอย่างแห้งประมาณ 1 วัน

การทดลองนี้ เป็นการวัดขนาดปลายของโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอที่สร้างขึ้น โดยใช้โมเลกุลของโพลิเมอร์ที่เป็นมาตรฐานคือขนาด 500 นาโนเมตร ภาพที่ได้จากการทดลองนี้จะ เป็นภาพภูมิประเทศ โดยในรูปที่ 4.6 เป็นภาพภูมิประเทศขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตร ระดับของสีแทนความสูงของพื้นผิว โดยสีดำคือระดับพื้น (Ground) สีเทาคือความสูงที่ 100 นาโนเมตร และสีขาวคือความสูงที่ 200 นาโนเมตร และในรูปที่ 4.7 เป็นภาพภูมิประเทศขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตร ระดับของสีแทนความสูงของพื้นผิว โดยสีดำคือระดับพื้น (Ground) สีเทาคือความสูงที่ 50 นาโนเมตร และสีขาวคือความสูงที่ 100 นาโนเมตร



รูปที่ 4.9 แสดงภาพภูมิประเทศของโพลิเมอร์ 500 นาโนเมตรขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตร ที่ ความสูง 200 นาโนเมตร



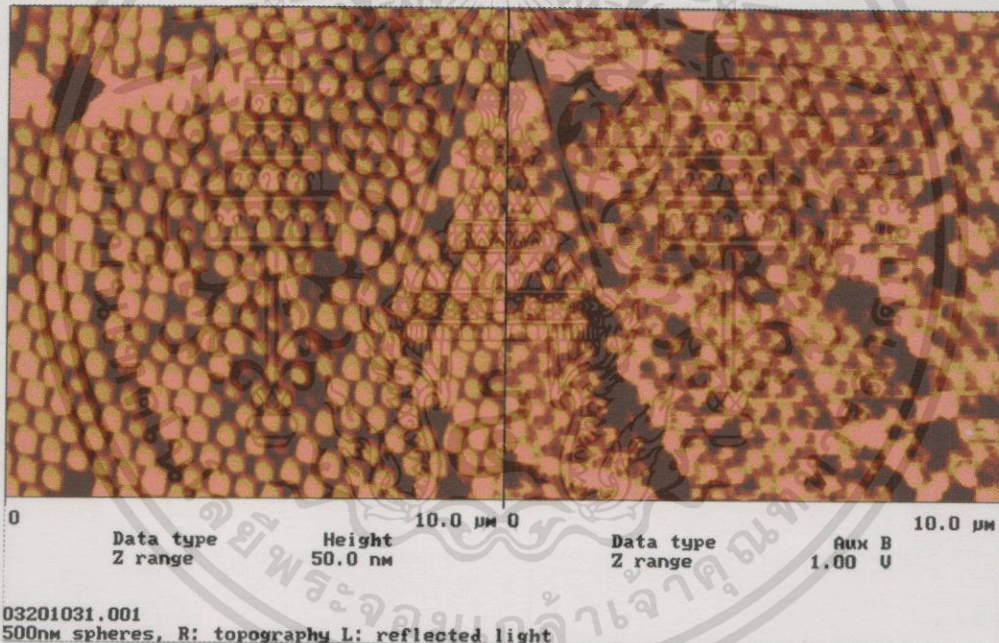
รูปที่ 4.10 แสดงภาพภูมิประเทศของโพลีเมอร์ 500 นาโนเมตรขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตร ที่ความสูง 100 นาโนเมตร

4.3 การทดลองหาภาพเชิงแสงของโพรบใยแก้วนำแสงชนิดอกกับโพลีเมอร์ ขนาด 500 นาโนเมตร

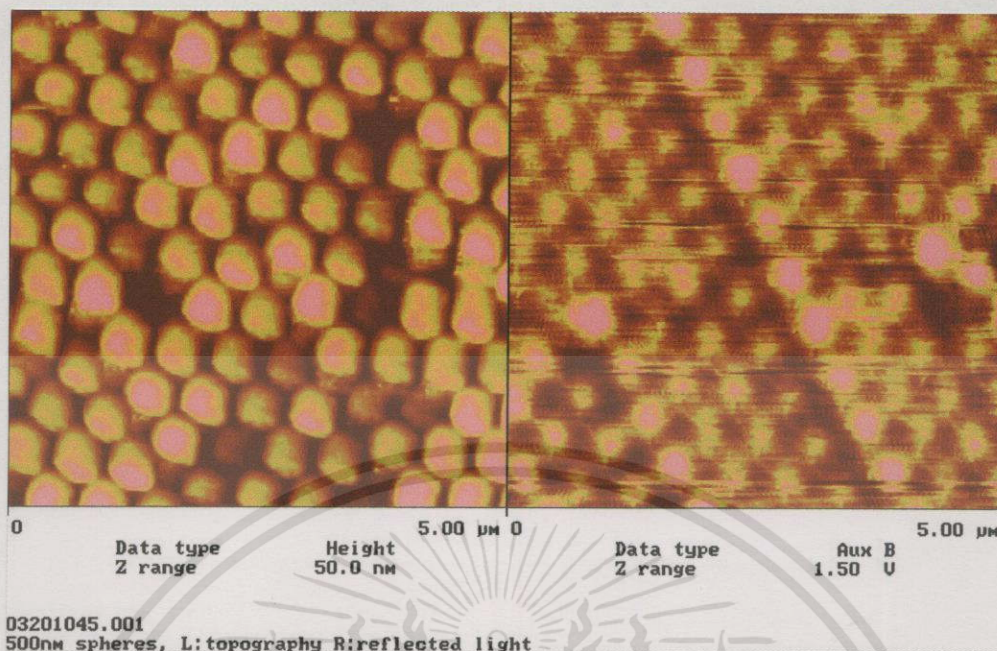
ในการทดลองนี้ จะได้ภาพออกมา 2 ภาพคือภาพภูมิประเทศและภาพเชิงแสงพร้อมๆ กันจากโพรบอันเดียวกัน ภาพทางซ้ายคือภาพภูมิประเทศ เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงของโพรบตามลักษณะภูมิประเทศของพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งตัวกล้องจุลทรรศน์จะบันทึกการเปลี่ยนแปลงนี้ด้วยโฟโตไดโอด 4 ส่วน ภาพภูมิประเทศที่ได้จากโพรบอันนี้จะคล้ายกับภาพที่ได้จากโพรบซิลิกอนมาตรฐาน โดยจะต่างกันตรงที่ความละเอียด เนื่องจากโพรบซิลิกอนสร้างจากวิธีการทางเคมี ทำให้มีปลายแหลมกว่า ระดับสีที่เห็นในรูปทางซ้ายมือแสดงระดับความสูงต่ำของพื้นผิว ส่วนภาพทางขวาคือภาพเชิงแสง ซึ่งเกิดจากการที่แสงส่องทะลุผ่านตัวอย่าง และระดับสีแทนค่าการส่องทะลุผ่านของแสง ของตัวอย่าง กำลังของแสงเลเซอร์ที่ออกมาที่ปลายของโพรบจะมีค่าประมาณ 4 ถึง 10 ไมโครวัตต์ โดยจะเกิดการสูญเสียในระหว่างเดินทางประมาณ 400 ถึง 1,000 เท่า เพราะฉะนั้นอีกด้านหนึ่งของโพรบใยแก้วนำแสงจะใช้แสงเลเซอร์ขนาด

ประมาณ 5 ถึง 10 มิลลิวัตต์ การสูญเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้นเกิดจากการโค้งงอ การลดขนาดของใยแก้วนำแสงลง และมุงงอ โดยใยแก้วนำแสงที่มีมุงงอมาก จะสูญเสียแสงมากกว่าใยแก้วนำแสงที่มีมุงงอน้อยกว่า

ภาพที่ได้จากการทดลองนี้ จะเป็นการพิสูจน์ว่าใยแก้วนำแสงชนิดงอนี้สามารถใช้งาน เพื่อให้ได้ภาพเชิงแสงได้ โดยในรูปที่ 4.10 เป็นภาพภูมิประเทศ (ซ้าย) และภาพเชิงแสง (ขวา) ขนาด 10 x 10 ตารางไมโครเมตร ระดับของสีของภาพภูมิประเทศแทนความสูงของพื้นผิว โดยสีดำคือระดับพื้น (Ground) สีเทาคือความสูงที่ 25 นาโนเมตร และสีขาวคือความสูงที่ 50 นาโนเมตร และระดับของสีของภาพเชิงแสงแทนการทะลุผ่านของแสงโดยสีดำคือแสงไม่สามารถทะลุผ่านได้ สีขาวคือแสงทะลุผ่านได้ รูปที่ 4.11 เป็นภาพภูมิประเทศ (ซ้าย) และภาพเชิงแสง (ขวา) ขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตร



รูปที่ 4.11 แสดงภาพภูมิประเทศ (ซ้าย) และภาพเชิงแสง (ขวา) ของโพลิเมอร์ 500 นาโนเมตร ขนาด 10 x 10 ตารางไมโครเมตร จากโพรบงอที่ความสูง 50 นาโนเมตร



รูปที่ 4.12 แสดงภาพภูมิประเทศ (ซ้าย) และภาพเชิงแสง (ขวา) ของโพลีเมอร์ 500 นาโนเมตร ขนาด 5 x 5 ตารางไมโครเมตรจากโพรบองที่มีความสูง 50 นาโนเมตร

4.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง ได้ทำการทดสอบปลายของโพรบใยแก้วนำแสงชนิดอ ด้วยเกรตติงขนาดช่องว่าง 1 ไมโครเมตร ได้ขนาดของภาพภูมิประเทศตั้งแต่ 100 ตารางไมโครเมตร จนถึง 4 ตารางไมโครเมตร และได้แสดงภาพภูมิประเทศที่ได้จากโพรบซิลิกอนมาตรฐานสำหรับใช้ในกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส เพื่อเปรียบเทียบกับภาพจากโพรบที่ทำขึ้น และได้ทดสอบปลายของโพรบใยแก้วนำแสงชนิดอแบบ near-field กับตัวอย่างที่เป็นโพลีเมอร์ที่มีขนาดโมเลกุล 500 นาโนเมตร ซึ่งสามารถได้ภาพที่มีความละเอียดสูง โดยสามารถวัดขนาดของโมเลกุลของโพลีเมอร์ได้ที่ 500 นาโนเมตร และยังสามารถมองเห็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ซึ่งมีขนาดเล็กประมาณ 200 ถึง 300 นาโนเมตรได้ หลังจากนั้น จึงเป็นการหาภาพเชิงแสงจากโพรบใยแก้วนำแสงชนิดอ ซึ่งพบว่าสามารถเห็นแสงที่ทะลุผ่านโมเลกุลของโพลีเมอร์ได้ อีกทั้งการได้ภาพเชิงแสงนี้ เป็นการนำโพรบใยแก้วนำแสงชนิดอ เข้าไปแทนที่โพรบของกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส โดยไม่ต้องมีการดัดแปลงกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสแต่อย่างใด ซึ่งจากการทดลองทั้งหมดนี้ ด้วยเกรตติงมาตรฐาน ด้วยโพลีเมอร์ขนาดโมเลกุล 500 นาโนเมตร ได้ผลดังรูปที่ 4.1 จนถึงรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.9 และได้ภาพเชิงแสงที่มีความละเอียดสูงถึง 200 นาโนเมตร ซึ่งเป็นภาพเชิงแสงจากโพรบใยแก้วนำแสงชนิดอ ตั้งแต่รูปที่ 4.10 จนถึง 4.11

บทสรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อ

5.1 บทสรุป

งานวิจัยเรื่องการผลิตโพรบใยแก้วนำแสงชนิดอแบบ near-field ที่สามารถควบคุมได้ โดยวิธีการอาร์คด้วยไฟฟ้า เพื่อนำไปแทนที่โพรบซิลิกอนในกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส โดยไม่ต้องมีการดัดแปลงกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสแต่อย่างใด และได้ภาพเชิงแสงจากโพรบ ใยแก้วนำแสงชนิดอที่มีความละเอียดดีกว่าภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงทั่วๆ ไป และยังสามารถนำไปพัฒนาทางด้านเทคนิคต่อไป เพื่อให้มีขีดความสามารถที่สูงขึ้นได้ทั้งในด้าน ความละเอียดและ ความเร็ว อีกทั้งในงานวิจัยฉบับนี้ยังได้เสนอและอธิบายวิธีการในการสร้าง เครื่องมือต่างๆ เพื่อใช้ในการผลิตโพรบใยแก้วนำแสงชนิดอแบบ near-field ไม่ว่าจะ เป็น เครื่องจ่ายไฟฟ้าสลับแรงดันสูง เครื่องจับยึดใยแก้วนำแสง เพื่อการดึงและการงอ รวมทั้งค่าตัว แปรต่างๆ ที่สามารถนำไปดัดแปลงและพัฒนาได้อย่างสะดวกต่อไป

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและการแก้ปัญหา

เนื่องจากขนาดของภาพที่ได้จากการสแกนมีขนาดเล็กมาก เช่น 10 x 10 ตาราง ไมโครเมตร หรือ 5 x 5 ตารางไมโครเมตร หรือบางครั้ง 1 x 1 ตารางไมโครเมตร ทำให้ไม่สามารถทำการสแกนในจุดเดียวกันได้ทุกครั้ง เมื่อมีการเลื่อนหรือเคลื่อนย้ายตัวอย่างไปมา เช่น ถ้าไม่สามารถทำการเก็บภาพให้เสร็จได้ภายในวันเดียว และจำเป็นต้องเก็บตัวอย่างไว้ในตู้ ควบคุมฝุ่น อุณหภูมิและความชื้นไว้ เพื่อทำการทดลองต่อไปในวันรุ่งขึ้น ดังนั้นจะต้องพยายาม ทำการสแกนภาพและทดลองให้เสร็จก่อนที่จะมีการเคลื่อนย้ายตัวอย่าง และจะต้องพยายาม เตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ให้ครบถ้วน ก่อนที่จะนำตัวอย่างออกมาทำการทดลองใช้ เนื่องจากการทิ้ง ตัวอย่างไว้ในห้องทดลอง อาจจะทำให้ตัวอย่างได้รับความเสียหายจากฝุ่นละอองในห้อง หรือ อาจจะต้องเปลี่ยนไปทดลองในห้องสะอาด ที่สามารถควบคุมหรือจำกัดปริมาณของฝุ่นละออง ในห้องทดลองได้

5.3 การพัฒนาต่อไป

โพรบใยแก้วนำแสงชนิดอแบบ near-field นี้ สามารถนำไปพัฒนา เพื่อให้ได้ภาพเชิง แสงที่มีความละเอียดสูงขึ้น โดยปรับปรุงในส่วนต่างๆ ของระบบดังนี้คือ พัฒนาโพรบใยแก้วนำ

แสงอให้ปลายมีขนาดเล็กลง อาจจะใช้วิธีการทางเคมีที่เรียกว่า Etching เนื่องการดึงด้วยความร้อน ยังมีข้อจำกัดอยู่ในการทำให้ปลายมีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งน่าจะใช้ขบวนการทางเคมีช่วยได้ เพื่อให้มีปลายขนาดเล็กกว่าวิธีการอาร์กด้วยไฟฟ้า แต่อาจต้องคำนึงถึงขนาดของโมเลกุลของสารที่ใช้เคลือบผิว ถ้าปลายมีขนาดเล็ก แต่ไม่สามารถเคลือบผิวเพื่อปกป้องแสงเลเซอร์ไม่ให้รั่วออกมาได้ ก็จะไม่สามารถใช้งานเพื่อให้ได้ภาพเชิงแสงได้ และเลือกใช้แหล่งกำเนิดความร้อนแบบอื่นๆ เช่น ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ ในการดึงและงอใยแก้วนำแสง เพื่อให้ได้ความแม่นยำที่สูงขึ้น เนื่องจากความร้อนจากเลเซอร์จะให้ค่าพลังงานที่แน่นอนกว่าการอาร์กด้วยไฟฟ้า ซึ่งความร้อนจากการอาร์กด้วยไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความชื้นและลม ณ สถานที่ทดลอง ส่วนการใช้เลเซอร์นั้น เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ใยแก้วนำแสง จำเป็นที่จะต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ เนื่องจากใยแก้วนำแสงมีลักษณะเป็นแก้วใส แสงเลเซอร์ทั่วไปไม่สามารถทำให้ใยแก้วนำแสงร้อนได้ แต่คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์สามารถทำได้เนื่องจากความยาวคลื่นของคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์สัมพันธ์กับธาตุซิลิกอนที่เป็นเนื้อสารของใยแก้วนำแสงทั่วไป แต่ต้องระวังเป็นอย่างมาก เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ เป็นเลเซอร์ที่ไม่มีสี จึงไม่สามารถสังเกตเห็นขณะปฏิบัติการได้ และอาจเป็นอันตรายได้ และรวมทั้งการพัฒนาความเร็วของตัวสแกน เพื่อให้ได้ภาพเร็วขึ้น เนื่องจากวงจรของการบอกลับและข้อจำกัดของเพียโซ ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว ทำให้ไม่สามารถได้ภาพของเซลล์สิ่งมีชีวิตในขณะที่เคลื่อนที่ได้ ถ้าสามารถพัฒนาให้ตัวกวาดมีความเร็วในการกวาดสูงมากๆ อาจจะได้ภาพของเซลล์สิ่งมีชีวิตที่กำลังเคลื่อนไหว หรือดูพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตเล็กมากๆ ได้

5.4 การประยุกต์ใช้งาน

จากขั้นตอนในการทำโพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอแบบ near-field ในบทที่ 4 และความสามารถในการได้ภาพภูมิประเทศและภาพเชิงแสงพร้อมๆ กัน จากการใช้โพรบนี้กับกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอส และในบทที่ 5 ตัวโพรบนี้สามารถได้ภาพภูมิประเทศและภาพเชิงแสงที่มีความละเอียดสูงถึง 200 นาโนเมตร จากการทดสอบด้วยเกรตติงขนาด 1 ไมโครเมตร และโมเลกุลของโพลิเมอร์ 500 นาโนเมตร จากทั้งหมดมานี้ โพรบใยแก้วนำแสงชนิดงอแบบ near-field สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานได้หลายๆ ด้านได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะงานทางด้านชีวภาพ ที่ต้องการดูลักษณะภายนอกของเซลล์สิ่งมีชีวิตจากภาพภูมิประเทศ และพร้อมกับการดูอวัยวะภายในจากภาพเชิงแสง ในขณะเดียวกัน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาทางด้านโครงสร้างภายนอกและโครงสร้างภายในของเซลล์สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก และยังสามารถใช้ในการศึกษาโครงสร้างและลักษณะเชิงแสงของวัตถุฟิล์มบางได้เป็นอย่างดี โดยในการศึกษาวัตถุฟิล์มบางที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปร่งแสง จะแสดงคุณสมบัติเชิงแสง (Optical property) ออกมาในภาพเชิงแสง และในขณะเดียวกันก็สามารถแสดงลักษณะภูมิประเทศของพื้นผิวของฟิล์มบางได้ในภาพภูมิประเทศ โพรบายแก้วนำแสงชนิดอแบบ near-field นี้สามารถใส่เข้าไปในกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสได้โดยตรง และไม่ต้องมีการดัดแปลงกล้องจุลทรรศน์อะตอมมิกฟอสแต่อย่างใด และยัง สามารถในการได้ทั้งภาพภูมิประเทศ และภาพเชิงแสงพร้อมๆ กัน ซึ่งในภาพเชิงแสงที่ได้จากโพรบายแก้วนำแสงชนิดอแบบ near-field นี้มีความละเอียดสูงกว่า ภาพเชิงแสงจากกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาอีกด้วย จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านการค้นคว้าวิจัยทางด้านชีวภาพ ไม่ว่าจะเป็นเซลล์พืชหรือเซลล์สัตว์ ซึ่งมีลักษณะของเซลล์ที่มีความโปร่งใส และสามารถทำการย้อมสี เนื่องจากเซลล์ต่างชนิดกันจะมีการดูดซับสีไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นประโยชน์ในการการดูอวัยวะภายในเซลล์สิ่งมีชีวิตโดยไม่ต้องผ่าเซลล์



เอกสารอ้างอิง

- [1] G, Binnig and C, F, Quate. 1986. Atomic Force Microscopy. Physic Letter 57. pp 930.
- [2] D, W, Pohland and D, Courjon. Near Field Optics. Kluwer : Dordrecht. 1993.
- [3] M, A, Paeslerand and P, J, Moyer. Near-field Optics. Wiley : NewYork. 1996.
- [4] M, Xiao. Jul/Aug 1997. Fabrication of Probe Tips for Reflection Scanning Near-Field Optical Microscopes: Chemical Etching and Heating-Pulling Methods. Journal of Vaccum Science Technology B 15(4). pp. 1516.
- [5] Y, H, Chuang. Feb 1998. A Simple Chemical Etching Technique for Reproducible Fabrication of Robust Scanning Near-Field Fiber Probes. Review of Scientific Instruments Vol. 69 No. 2, pp. 437.
- [6] N, Essaidi. 1 Feb 1998. Fabrication and Characterization of Optical-Fiber Nanoprobes for Scanning Near-field Optical Microscopy, Applied Optics Vol. 37 No. 4. pp. 609.
- [7] E, Betzig. et. al. 1992. Combined Shear Force and Near-field Scanning Optical Microscopy. Apply Physics Letter 60. pp. 2484.
- [8] R.Toledo-Crow. et. al. 1992. Near-field Differential Scanning Optical Microscope with Atomic Force Regulation. Apply Physics Letter 60. pp. 2957.
- [9] M, Lee. 1996. An Impedance Based Non-contact Feedback Control System for Scanning Probe Microscopes. Review of Scientific Instruments. 67. pp. 1468.
- [10] J, W, P, Hsu. et. al. 1995. A Nonoptical Tip-Sample Distance Control Method for Near-field Scanning Optical Microscopy Using Impedance Changes in an Electromechanical System. Review of Scientific Instruments. 66. pp. 3177.
- [11] Canon Inc. Lens Work II. Tokyo : Sezax Corporation. 1996.
- [12] F, L, Pedrotti, S.J. and L, S, Pedrotti. Introduction to Optics, 2nd. New jersey : Prentice Hall, Inc. 1993.
- [13] J, Powers. An Introduction to Fiber Optic System. 2nd California : Irwin. 1997.
- [14] A, Katiz. Lasers and Optical Fibers in Medicine. San diego : Academic Press, Inc. 1993.

- [15] Digital Instrument. BioScope™ Instruction Manual Version 4.20. New York : Digital Instrument, Inc. 1996.
- [16] คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฟิสิกส์ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2537.



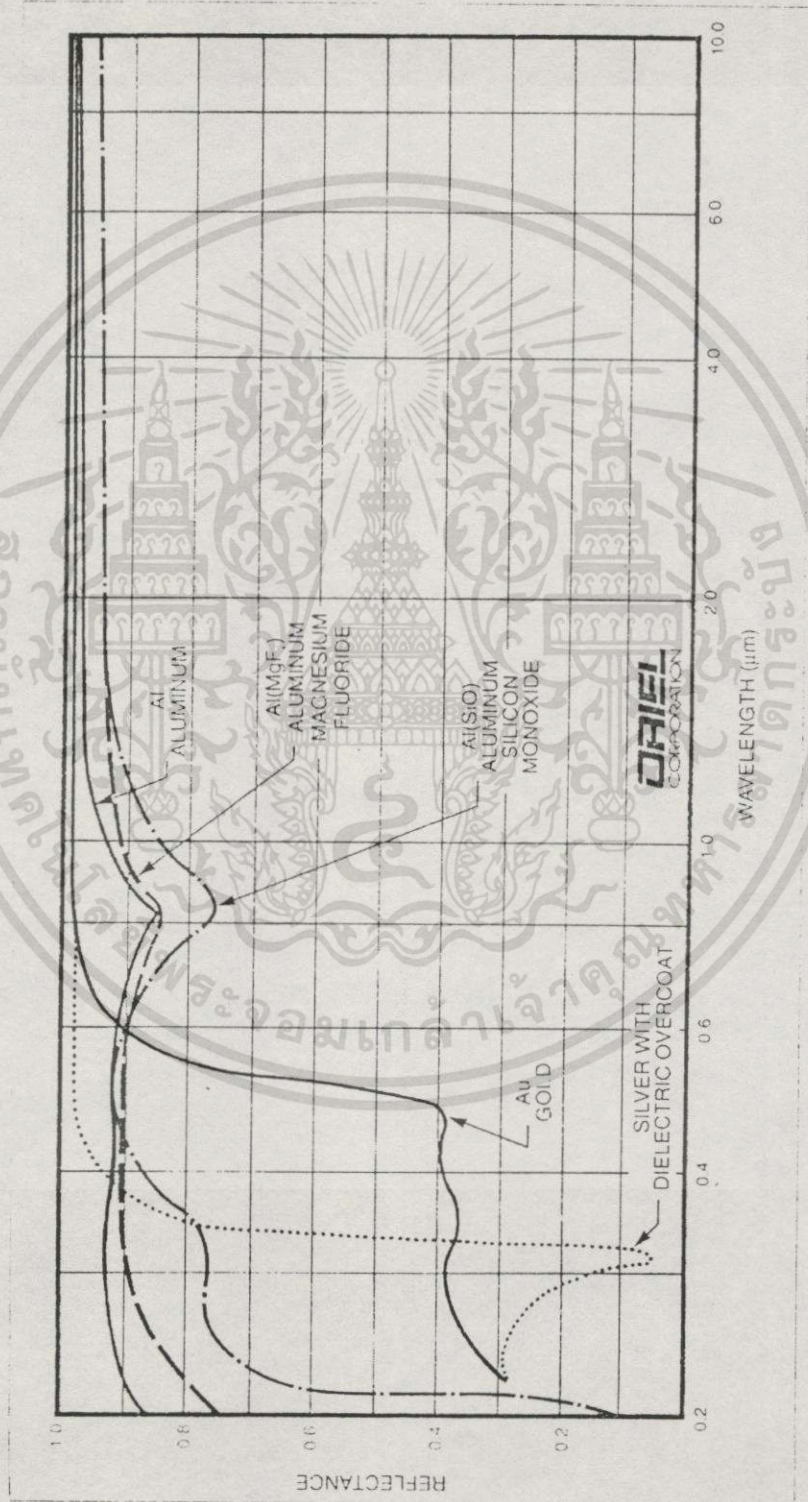
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ค่าการสะท้อนของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ กับโลหะชนิดต่างๆ ของบริษัท Oriel (1/1)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

Datasheet ของ Photo Diode ของบริษัท UDT (1/6)

APPLICATION OF SILICON PHOTODIODES

PREFACE

This section is intended as a brief tutorial on light detection using silicon photodiodes. In addition to the extensive range of standard devices described herein, UDT Sensors offers custom device design. UDT Sensors welcomes the opportunity to meet your application specific requirements, and will assist with technical advice, design, and fabrication. Applications engineers are available to assist you at every step of your design process.

GLOSSARY OF TERMS

Breakdown Voltage is the voltage at which the electric field penetrates the dielectric and the photodiode begins to act as a conductor. The breakdown voltage is usually taken as the voltage when dark current exceeds a predetermined value.

Dark Current (I_d) is the leakage current of the photodiode operating in the dark with a reverse bias voltage. There are four major contributions to dark current: diffusion current, generation-recombination current, surface current, and avalanche current. Dark current increases with temperature, reverse bias, and active area.

Junction Capacitance (C_j) is similar to the capacitance of a parallel plate capacitor. The capacitance decreases with reverse bias, and increases with active area.

NEP (Noise Equivalent Power) is the incident signal power on the detector that produces a rms signal to noise ratio of 1. It is a figure of merit used to measure the minimum signal power detectable.

Photoconductive (PC) is the mode of operation in which a reverse bias is applied across the photodiode. The result is a wider depletion region, lower junction capacitance, lower series resistance, shorter rise time, and linear response in photocurrent over a wider range of light intensities. However, as reverse bias is increased, shot noise increases due to increased dark current.

Photovoltaic (PV) is the mode of operation in which no external bias is applied across the photodiode. The result is that there is no dark current, so the only source of noise is thermal noise. This allows increased sensitivity to low light levels. Frequency response is lower due to high junction capacitance. Responsivity at longer wavelengths is also slightly lower.

Quantum Efficiency (QE) The quantum efficiency of a silicon photodiode is the percentage of the number of incident photons that penetrate the silicon crystal and produce electron-hole pairs that subsequently get collected. The quantum efficiency is just another way of measuring the effectiveness of the basic light to the electrical current conversion process within the silicon cell and thus has a direct relationship to responsivity.

$$QE = 124\% \cdot R/\lambda \text{ (}\mu\text{m)}$$

Rise Time (T_r) is the time taken for the output to respond to an input step waveform. It is the time for the output to rise from 10% to 90% of its peak value.

INTRODUCTION

Silicon photodiodes are quantum detectors sensitive to charged particles and light to 1100 nm, which extends from x-rays through the visible to the near infrared. Photodiodes operate by the absorption of light photons or charged particles to generate a flow of current in an external circuit. Photodiodes can be used to detect the presence or absence of minute quantities of light and can be calibrated to measure the intensity of light extremely accurately from intensities below 1 picowatt/cm² to intensities above 10 mW/cm². They can also be used for optical position sensing to measure displacement, angle, centering, surface uniformity, and distance. Silicon photodiodes have found use in such diverse applications as photography, analytical instrumentation, laser ranging, optical communications, and medical imaging devices.

SEMICONDUCTOR THEORY

Semiconductors have a small energy gap (E_g) between the conduction and valence bands (Silicon: $E_g = 1.12\text{eV}$). In silicon, the valence band is completely filled and the conduction band is vacant at room temperature. In order to conduct electricity, electrons must be excited from the valence band into the conduction band. This can be done thermally, by exposure to high energy particles, or by exposure to light. An incident photon of energy greater than or equal to the bandgap of the semiconductor will produce an electron-hole pair. The intrinsic electric field of the P-N junction prevents recombination of the pair, and sweeps the holes to the P-type region and the electrons to the N-type region. The anode becomes positive with the accumulation of holes, and the cathode becomes negative with electrons. This potential causes current to flow in an external circuit from the anode to the cathode. This is the photovoltaic effect — the generation of a current from a P-N junction when exposed to light.

DEVICE CONSTRUCTION

Planar diffused PIN photodiodes are typically made by diffusing an N+ layer on the back of N type bulk material for Ohmic contact, and a P+ layer on the front in the active area defined by an oxide mask to make a P+ N junction. The top surface oxide layer serves as a diffusion mask to define the shape of the active area as well as to form a stable passivated junction. The bulk region between the junction and the N+ back layer serves as the absorption region. The back metallization, in addition to providing an electrical contact, acts as a reflector for any light which was not absorbed, and improves sensitivity at longer wavelengths where silicon has a lower absorption coefficient. Figure 1 shows the construction of a planar diffused P+ N N+ silicon photodiode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Datasheet ของ Photo Diode ของบริษัท UDT (2/6)

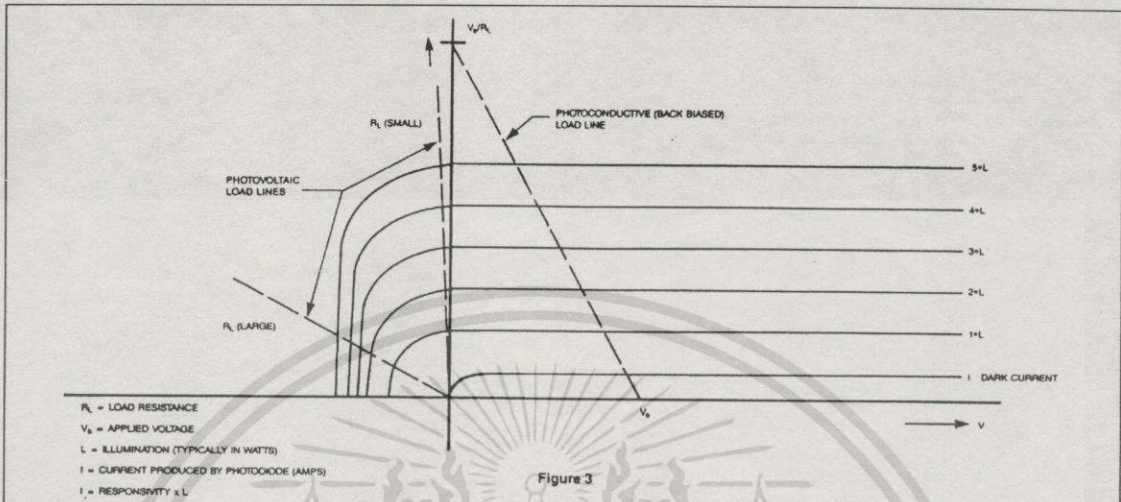


Figure 3

Figure 3: shows the characteristic photodiode I-V curves. A load line for the photoconductive (reverse bias) mode is shown on the section of the graph to the right of the zero voltage line, and a load line for the photovoltaic mode is shown to the left of the zero voltage line. The photodiode operating point is found where the I-V characteristic of the load (the load line) intersects the photodiode I-V characteristic. In the photovoltaic mode, the load line passes through the origin and intersects the photodiode characteristic near the knee. In the photoconductive mode, the load line is shifted by the bias voltage and intersects the photodiode characteristic in the flatter portion. If the device is working into a short circuit, corresponding to a vertical load line, the current output is linear with increasing light intensity. As R_L increases, the slope ($m = 1/R_L$) of the load line decreases. Ultimately, the response becomes nonlinear as the load line approaches a horizontal slope, and the open circuit condition is reached. The open circuit voltage varies as the logarithm of the incident radiation.

The linear relationship between short circuit current and input light intensity breaks down when the diode junction voltage approaches the built-in voltage V_b . The upper bound on photocurrent for maintaining linearity is approximately $1\text{mA}/\text{cm}^2$. In the photoconductive mode, linear operation is maintained as long as the saturation power is not exceeded. The bias level must remain higher than the product of the maximum signal current and the load resistance to maintain linearity. To calculate the maximum power density attainable, use the following formula:

$$P = (V_b + V)/(R_L \cdot R_s) \quad (7)$$

- where P_{max} = maximum power (watts)
- V_b = built-in voltage
- V = applied bias voltage
- R_L = load resistance
- R_s = responsivity

A virtual ground obtained by an operational amplifier is often used to minimize the effective load to the photodiode. The operational amplifier acts as a current to voltage converter with the output signal amplified by a large

feedback resistor R_f . The effective detector load resistance is $R_L = R_f/A_o$ where A_o is the open loop gain of the op-amp. This is only valid when $R_{sh} \gg R_f$ and $A_o \gg 1 + R_f/R_{sh}$.

RESPONSIVITY

The responsivity of a silicon photodiode is a measure of the sensitivity to light and is defined as the ratio of the photocurrent (amperes) to the incident light (watts).

$$R_s \text{ (responsivity)} = I \text{ (amperes)} / L \text{ (watts)} \quad (8)$$

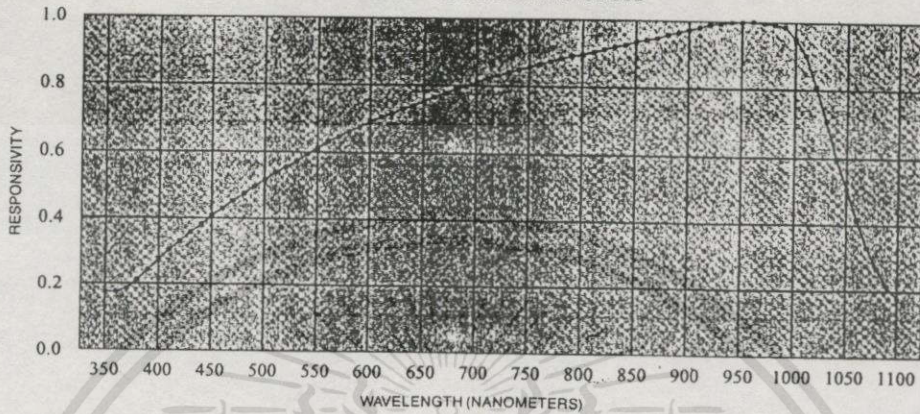
(See figure 4.)

The maximum responsivity occurs between 850 and 950nm and is about 0.5 A/W at the peak. The photovoltaic effect is a quantum effect i.e. one incident photon produces one electron-hole pair or none at all. The incoming light beam thus represents a stream of photon particles that is converted at a certain efficiency to a stream of electrons or electrical current. The responsivity is a measure of the effectiveness of the light current to electrical current transduction process. The responsivity will vary with the wavelength of incident light and will also vary slightly with changes in applied voltage and temperature. The reason for the responsivity change from 100% quantum efficiency with wavelength is that the light reflection and absorption coefficients of silicon change with wavelength. The applied voltage affects the collection process of the photogenerated electron-hole pairs within the silicon and thus varies the responsivity. Temperature changes affect both optical constants of the silicon cell and the collection process, thus varying the responsivity.

There are batch to batch variations in spectral responsivity. Absolute responsivity at the peak of sensitivity can vary between .3 A/W and .5 A/W. Relative variations in spectral response from one wavelength to another in different detectors can be as great as 15%. The relative and absolute variations however can be reduced to less than 2% on a selected basis when necessary in your application.

Datasheet ของ Photo Diode ของบริษัท UDT (3/6)

FIGURE 4
SPECTRAL RESPONSIVITY
NORMALIZED TYPICAL SILICON PHOTODIODE



NOISE, NEP AND DETECTIVITY (D*)

There are two basic sources of noise: shot current noise in the photodiode itself and thermal noise in the load resistor. The shot noise of a photodiode is related to the dark current:

$$i_{sn} = \sqrt{2qI_d \Delta f} \tag{9}$$

where q = electron charge
 I_d = dark current
 Δf = noise bandwidth

The thermal (Johnson) noise is:

$$i_{tn} = \sqrt{\frac{4kT \Delta f}{R_L}} \tag{10}$$

Total noise current through the load resistance R_L is the sum (in quadrature) of shot noise and thermal noise:

$$i_n = \sqrt{2qI_d \Delta f + \frac{4kT \Delta f}{R_L}} \tag{11}$$

Noise equivalent power is the amount of light falling on a photodiode which produces a signal equal to the total noise current generated by the photodiode itself.

$$NEP = \frac{i_n}{R} \tag{12}$$

When $R_L \gg \frac{2kT}{qI_d}$, $I_{sn} \gg i_{tn}$, and NEP becomes:

$$NEP = \frac{\sqrt{2qI_d}}{R} \tag{13}$$

The detectivity (D^*) is a measure of detecting ability of the photodiode.

$$D^* = \frac{\sqrt{\text{Area} \times \text{bandwidth}}}{NEP} = \frac{\sqrt{A \times \Delta f}}{NEP} \tag{14}$$

$$= R \left(\frac{A}{2eI_d} \right)^{1/2} \quad \frac{\text{cm} \sqrt{\text{Hz}}}{\text{watt}} \tag{15}$$

$$D^* (850, 900, 5) = 5.6 \times 10^{12} \text{cm} - \frac{\sqrt{\text{Hz}}}{\text{watt}} \tag{16}$$

that D^* is the detectivity for 850nm light chopped at 900 c/sec in a noise bandwidth of 5 Hz.

RESPONSE TIME AND CAPACITANCE

If a photodiode is instantaneously illuminated, it takes a certain time for the photogenerated current to flow in the external circuit. This is called the rise time (T_r) to a light pulse. If the light beam is instantaneously turned off, it takes a certain time for the photogenerated current to stop flowing. This is called decay time (T_d) to a light pulse. There are three basic causes for the response time:

- 1) Transit time of photogenerated carriers within the silicon crystal
- 2) Equivalent circuit RC type rise and decay time.
- 3) Trapping of photogenerated carriers within the silicon crystal.

The transit time is the sum of the times it takes the photogenerated minority carrier to move to the junction and the photogenerated majority carrier to move to the ohmic contact. The fact that PIN photodiodes collect photogenerated carriers in a strong electric field makes the transit time very short. A transit time of 1 nanosecond/mil of travel can be obtained in PIN photodiodes. Thus a PIN photodiode 5 mils thick could have a transit time of 5 nanoseconds if the applied external voltage were enough to deplete the detector fully. If the RC time constant and trapping time were less than 5 nanoseconds, then the observed rise and decay time would be 5 nanoseconds. The trapping effect of photogenerated carriers by deep lying energy centers in silicon can cause long rise and decay times. Proper selection of the starting material and a final device checkout eliminate this problem.

Datasheet ของ Photo Diode ของบริษัท UDT (4/6)

The equivalent circuit for a PIN photodiode was shown in Figure 2. There is a capacitance associated with the PIN junction, and it takes time for this capacitor to charge and discharge through the load resistor as the light is turned on and off. There is a 10-90% response time whose value is:

$$T_r = 2.2 R_L C_j \text{ (junction capacitance)}$$

This is the time it takes for the delivered current to change from 10 to 90% of the steady state value after the light is turned on or off. If the diode capacitance was 100pf and the load resistance was 1 kohm, the equivalent circuit limiting response times would each be 220ns. Although the transit time within the cell would be much faster, this response time would be the observed time.

There is thus a trade-off to be made in the selection of load resistance for both fast response time and high sensitivity. Fast response requires low load resistances while high sensitivity requires high load resistances. A compromise must be made for each application.

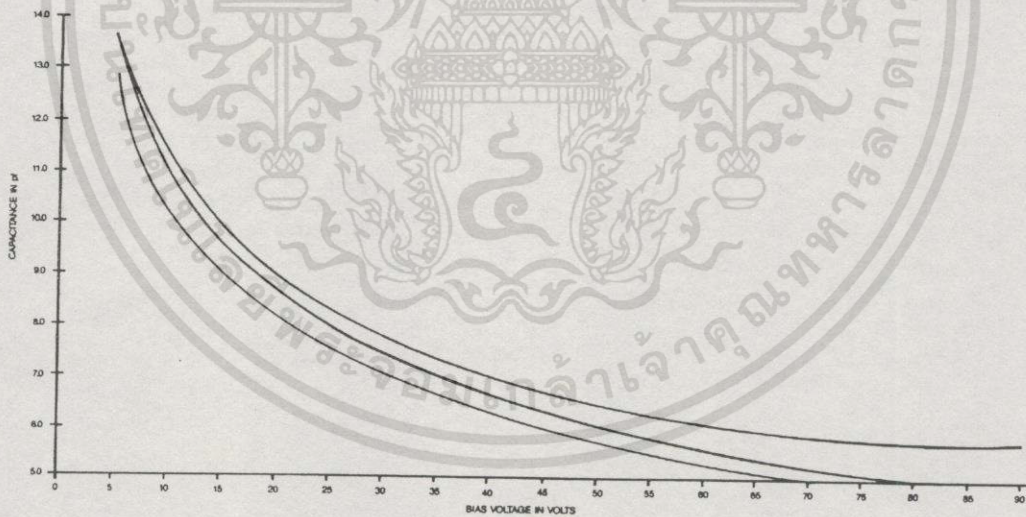
The capacitance of the junction is very important in determining RC response time. Figure 5 is a plot of PIN-5D capacitance versus reverse bias voltage. This function follows basically the same characteristic as depletion depth, relating the junction capacity to bias voltage and silicon resistivity by the expression $C = K/\sqrt{P \cdot V}$ where K is a constant determined by the geometry and area of the junction. On any given PIN device there is a step function decrease in junction capacity of 300% to 500% going from photovoltaic operation to a back biased operation of 5 volts. Further increases in bias voltage decreases capacity as the square of the increase in voltage.

LINEARITY OF OUTPUTS

The PIN photodiode behaves like a constant current generator. The amount of current is proportional to the incident light. Any variation in responsivity with light intensity represents a variation in linearity. Figure 6 shows the linearity of a group of PIN photodiodes. Maximum deviation from a straight line over the range of intensity from the limit of detectivity of 10^{-13} watts/cm² to 10^{-3} watts/cm² is 5%. Typical deviation is 1/2%. At input light intensities greater than 10 mw/cm², major deviations in linearity will begin to occur. At the higher light levels it is important to back bias the photocell for best linearity. Bias voltages greater than 50 volts should be used with light intensities greater than 10 mw/cm².

UNIFORMITY

When a small light spot is moved over the surface of a photodiode, deviation may be observed in the signal current. Uniformity is the term associated with this deviation. The magnitude of the variation in photocurrent is an inverse function of the beam diameter. With a .050 inch diameter light spot, the mean deviation in DC output over the surface of the active area is typically ± 2% for photodiodes manufactured by UDT. With a 1 mil diameter light spot, a mean deviation of 8% may be observed.



CAPACITANCE vs. BIAS VOLTAGE
PIN-5D
Figure 5

Datasheet ของ Photo Diode ของบริษัท UDT (5/6)

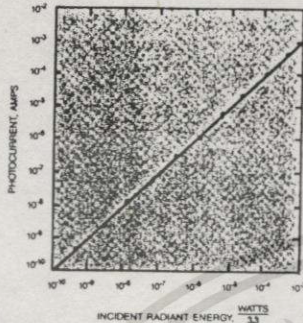
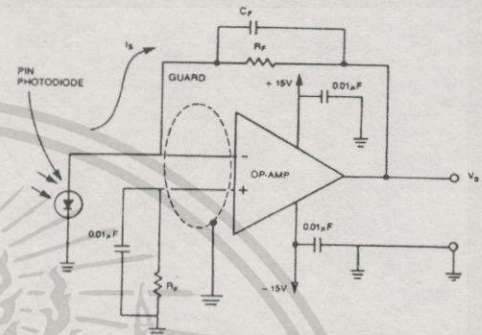


Figure 5
VARIATION OF OUTPUT ELECTRICAL CURRENT WITH INPUT LIGHT RADIANT ENERGY OF 8000 ANGSTROM WAVELENGTH.

PHOTOVOLTAIC (PV) OPERATION

The connecting circuit for PV operation usually employs an op-amp as shown below along with the corresponding I-V characteristics and load line. Note that the load line is very nearly vertical so that it intersects the photodiode characteristic curves where they are uniformly spaced.



CIRCUIT MUST BE WELL SHIELDED FOR LOW NOISE MEASUREMENTS.
CURRENT AMPLIFICATION WITH OP-AMP, PHOTOVOLTAIC MODE

L. TEMPERATURE CHARACTERISTICS

The two parameters of a silicon photodiode that can vary significantly with temperature are the responsivity and the dark leakage current. The dark current typically doubles every 10°C.

VI. OPTICAL FILTER DESIGN

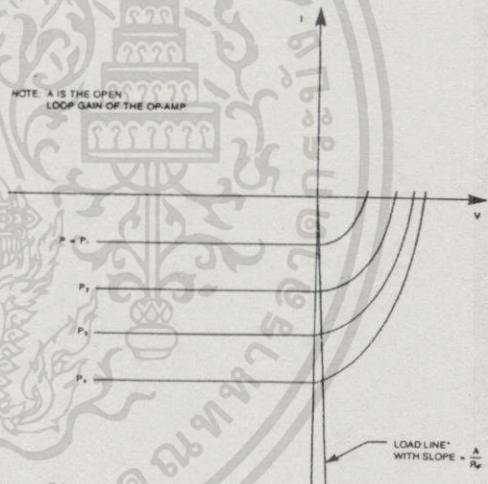
UDT offers a complete service for matching filters and anti-reflection coatings to your detector. UDT or customer supplied filters can be sealed in the detector cap in place of the hard glass window. Available filter types from UDT include:

- Narrow band interference filters from 2000Å to 1.06 microns
- Blocking filters with I.R., Visible, or U.V. pass characteristics
- Photopic filter for correction of the silicon curve to the standard observer CIE curve
- Colored glass filters for color evaluation

UDT's calibration service includes the calibrating of any of the aforementioned detector-filter combinations.

BASIC CIRCUIT EXAMPLES

The external circuit to which a silicon photodiode is connected usually contains a current-to-voltage converting element such as a resistor (passive) or a transresistance-type operational amplifier (active). In addition, the photodiode may be operated in the photovoltaic (PV) unbiased mode, or in the photoconductive (PC) mode in which a reverse bias is applied. The PV mode provides optimum signal-to-noise ratio for bandwidths up to about 350 kHz. In order to obtain wider bandwidths up to a few tens of MHz, the PC mode must be employed with a sacrifice in signal-to-noise ratio.



This provides good response linearity (that is, photocurrent follows incident light power in a linear fashion without saturation). PV operation of a silicon photodiode into a transresistance op-amp, as shown above, offers response linearity within 1% over up to nine decades of irradiance.

PV operation provides high signal-to-noise ratio for bandwidths up to about 350 kHz. This corresponds to a risetime on the order of 1 μsec.

Datasheet ของ Photo Diode ของบริษัท UDT (6/6)

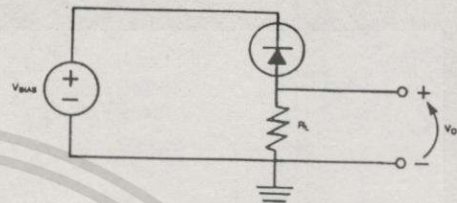
PHOTOCONDUCTIVE (PC) OPERATION

The connecting circuit for PC operation into an op-amp is shown below along with the corresponding I-V characteristic and load line. Note that the application of a reverse bias to the photodiode, moves the load line into the third quadrant where response linearity is even better than for PV operation.

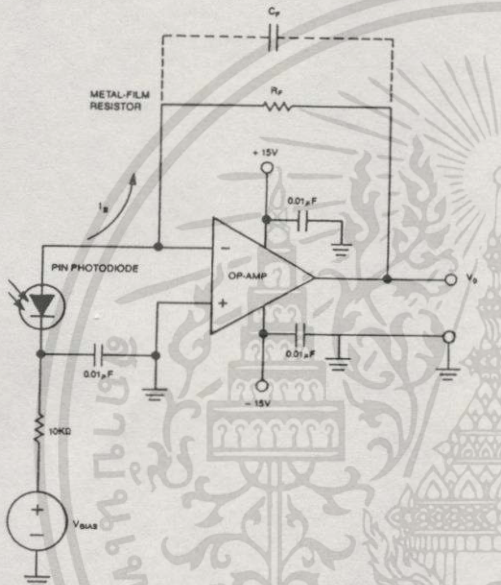
PC operation offers bandwidths to hundreds of MHz, providing an accompanying increase in signal-to-noise ratio. This corresponds to risetime (10% to 90%) down to about 0.5 nsec.

P ON N SILICON PHOTODIODES

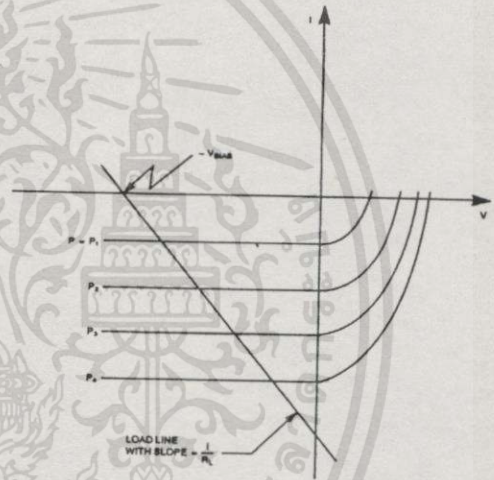
An alternate arrangement is PC operation into a load resistor (R_L) as shown below.



BASIC CIRCUIT, PHOTOCONDUCTIVE MODE

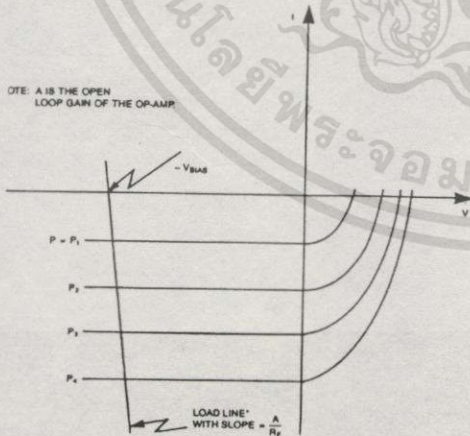


CURRENT AMPLIFICATION WITH OP-AMP, PHOTOCONDUCTIVE MODE



The simplicity of this connection is offset by its less desirable load line.

NOTE: A IS THE OPEN LOOP GAIN OF THE OP-AMP



RECOMMENDED OPERATIONAL AMPLIFIERS:

LOW NOISE:
ANALOG DEVICES AD 549
BURR-BROWN OPA 111, OPA 121, OPA 128, OPA 627

WIDE BANDWIDTH:
COMLINEAR CLC 401
HARRIS HA 2850, HFA 0002, HA 5160

LOW NOISE/WIDE BANDWIDTH:
BURR-BROWN OPA 671, OPA 621, OPA 627
HARRIS HA 5160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



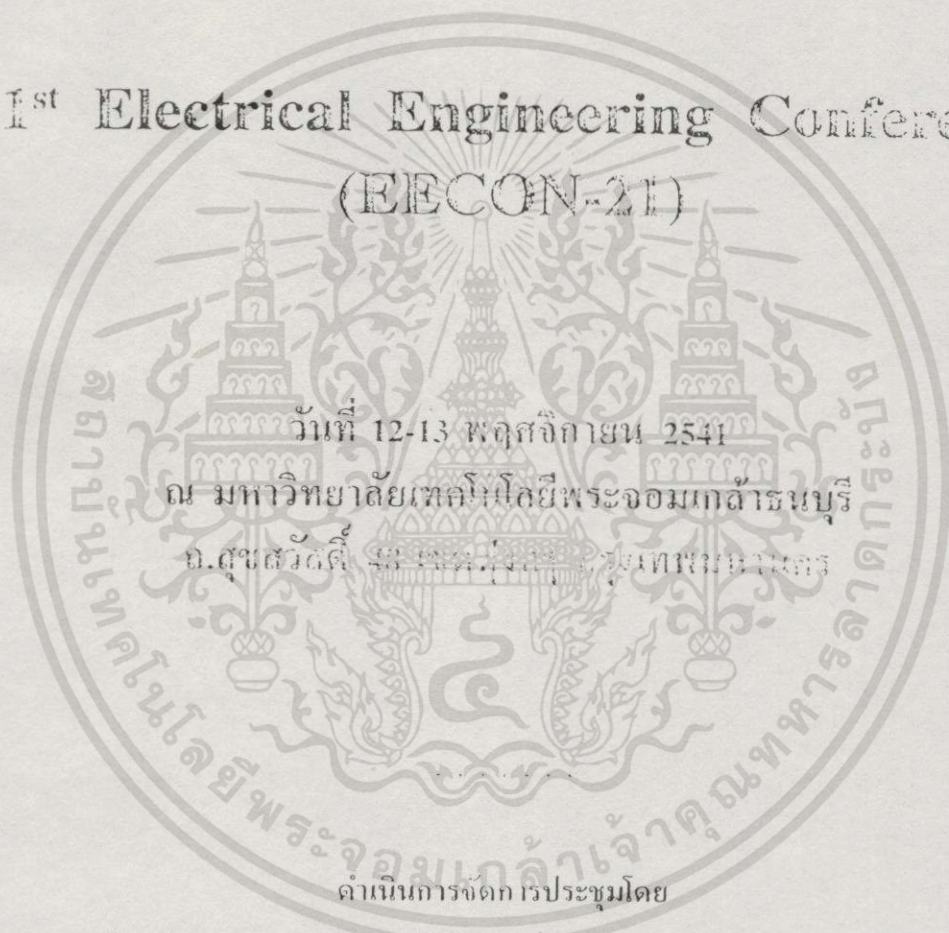
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ
ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21



21st Electrical Engineering Conference
(IEECON-21)



วันที่ 12-13 พฤศจิกายน 2541

ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

อ.สุขสวัสดิ์ 48 เขตคลองสาน กรุงเทพมหานคร

ดำเนินการจัดการประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Controllable Fabrication of Bent Near-field Optical Fiber Probes By Electric Arc Heating

Udom. Lewlomphaisarl,* Vanchai Riewruja,** Pairash Thajchayapong**

* Student of Graduate School, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

** Faculty of Engineering's Lecturer, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Charongkurng Rd, Ladkrabang Bangkok Thailand 10520

Phone (66-2) 3269989, FAX (66-2) 3269989, E-mail:vanchai@mvlsci.eng.kmitl.ac.th

Abstract

We present the construction of a high voltage electric arc puller for the controllable fabrication of bent near-field optical fiber probes. Various probes with bent angles ranging from 30° to 75° and bent lengths between 600 to 900 μm are successfully produced. The achieved tip diameters are between 100 to 200 nm. These bent type probes can be made into cantilevered probes usable for any dynamic mode atomic force microscope, and makes the construction of a scanning near-field optical microscope attainable with much less effort.

1. Introduction

The scanning near-field optical microscope (SNOM) has recently emerged as a powerful tool for performing optical measurements beyond the diffraction limit.[1] The operation relies on scanning an optical aperture, which can be used to transmit or/and receive the optical signal, above the sample in a distance range between 1 to 20 nm. The achieved resolution is usually between 10 to 100 nm, and various applications have already been demonstrated.[2,3]

Most of the reported SNOM systems make use of straight tapered fiber probes. The distance regulation is then accomplished by optical[4,5] or non-optical[6,7] detection of the shear force. On the other hand, several groups have adopted bent tapered fiber probes for their SNOMs.[8-13] Since the geometric structure of the bent type probes is similar to that of the probes used in an atomic force microscope (AFM), the distance control can be easily realized through the normal force detection. Therefore any dynamic mode AFM can be modified into a SNOM with much less effort. Also the bent fiber probes allow easy operation in liquids, which is especially important for biological research.[10]

The bent fiber probes have been so far fabricated by CO_2 laser[8-11] or electric arc heating.[12,13] However no detailed description of the fabrication process by either method is given in the literature. The arc heating has a major advantage over the CO_2 laser heating since the latter is invisible. Also an arc instrument can be built with substantially lower cost. In this paper, we present the construction of an electric arc puller for the controllable fabrication of near-field optical fiber probes

with different bent angles and lengths. The mechanical design, electronic circuit, arcing-pulling parameters, and AFM measurements will be described.

2. Design

The schematic diagram of the puller is shown in Fig.1, which consists of an arcing-pulling subsystem, a high voltage power supply, a stepping motor controller, and a computer control. The arcing is produced by applying high voltage to two sharpened tungsten electrodes (red label, Teledyne). The diameter is 1.6 mm, and the cone angle is around 15° . The relative position between the electrodes and the fiber is adjustable through a 3-axis mount (translation stages T1 to T3). The separation between the electrodes is around 2 mm, which can be adjusted by the translation stage T4. The arcing duration is regulated by TTL pulses from the stepping motor controller to the high voltage power supply.

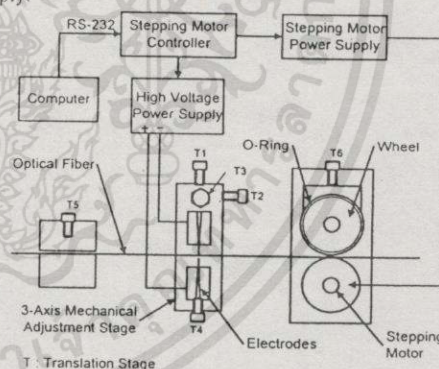


Fig.1 Schematic diagram of the electric arc puller

The left hand side of the optical fiber is placed in a brass base with a shallow groove in the center. The other side is fastened to the contact region of two brass wheels, which have a diameter of 5 cm and a thickness of 8 mm. The upper wheel has a 6 mm wide groove in the outer edge, which accommodates a 4 mm thick O-ring to produce the friction drive. The lower wheel, on the other hand, has a shallow groove to hold the fiber.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

The lower wheel is also attached to a stepping motor (103H548, Sanyo Denki, Japan) controlled by a stepping motor controller (OEM350X, Parker) and accompanied software named x-ware through the RS-232 interface. The translation stages T5 and T6 control the lock or release of the fiber. The photograph of the arcing-pulling subsystem is displayed in Fig.2 The whole unit is also put in an acrylic container to reduce environmental effects to the arcing. The circuit diagram for the high voltage power supply is depicted in Fig.3. A NE555 timer IC is used to generate symmetric 20 kHz square waves with the peak value equal to 15 V at point A.

The power transistor Q1 works as a high current switch controlled by the 20 kHz signal. Consequently the input signal at the transformer is also square waves with a peak value of approximately 23.5 V if the voltage drops across Q1, Q2 and the diode are taken into account. Since the transformation ratio is 65, the peak output voltage is roughly 1.5 kV.

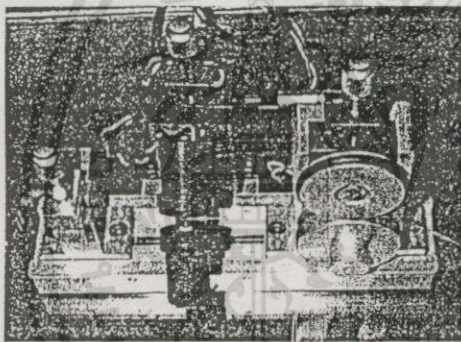


Fig.2 Photograph of the arcing-pulling Subsystem

The maximum input current for the 24 V source is 1.2 A, therefore the output current can not be larger than 15 mA if an 80% efficiency of the transformer is assumed. A second power transistor Q2 also serves as an switch, however, it is regulated by a comparator circuit which forces the average magnitude of the voltage at point B to be equal to that from the variable resistor.

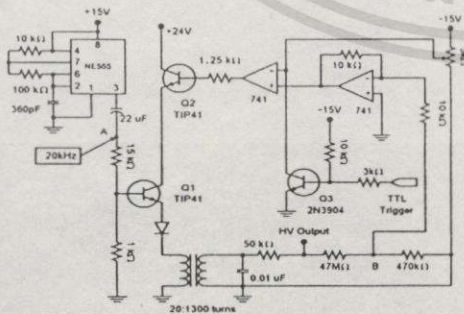


Fig.3 circuit diagram for the high voltage power supply

The magnitude of the high voltage output can thus be adjusted through the variable resistor. The resistors and the capacitor at the output end of the transformer function as an RC filter, and makes the high voltage output DC like. Finally the high voltage output is governed by the TTL pulses from the stepping motor controller. As a result, the arcing duration can be precisely regulated. The arcing current for the experiment described below is approximately 10 mA, which can be modified by changing the output resistors.

3. Experiment and Result

The fiber used for experiment was a 125 μm telecommunication single mode fiber (SMF1310, Prime Optical Fiber Corporation, Taiwan). After a small piece of coating was stripped off, the fiber was placed and tightened in the puller with the bare part located in the center of the arcing region. To produce a bent fiber probe, a straight probe was prepared first by single or multiple arcing-pulling cycles and then subject to a second arcing to create the desired bend. Each cycle was characterized by 4 parameters controlled through the x-ware. The arc first started and lasted for a duration $T(sec)$. The motor then moved with an acceleration $A (round/sec^2)$ until a final velocity $V(round/sec)$ was reached, and stopped at a total travel distance of $D (step)$. Since the diameter of the wheel was 5 cm and one round was set equal to 25000 steps, each round and each step corresponded to linear distances of 15.7 cm and 6.3 μm respectively.

In Fig.4(a), a straight fiber probe fabricated with one cycle process is shown. The taper length is around 1.1 mm. The parameters used were $T = 4, A = 5, V = 5, D = 500$. To reduce the taper length, the A and V had to be increased. However the length could not be further reduced below 800 μm, otherwise a blunt tip would occur. The change of parameters affected the taper length in similar fashions as observed in laser heating experiment.[14,15] Two heating-pulling cycles, on the other hand, were found to create shorter taper lengths. The probe shown in Fig.4(b) was fabricated by such process, and the parameters for the first and the second cycles were $T = 1, A = 5, V = 0.1, D = 50$, and $T = 1, A = 5, V = 1, D = 200$ respectively.

The first 50-step pulling, which was roughly a 315 μm travel distance, did not break the fiber, but reduced the diameter of the fiber at the arcing region to be near 30 μm.

The second cycle broke the fiber and created a straight probe with the taper length around 700 μm. The successfully fabricated probes by one or two cycle process usually had tip diameters between 100 to 200 nm from scanning electron microscopy measurements, which are useable for the SNOM. However the success rate of producing such fine tips achieved so far is only 20%.

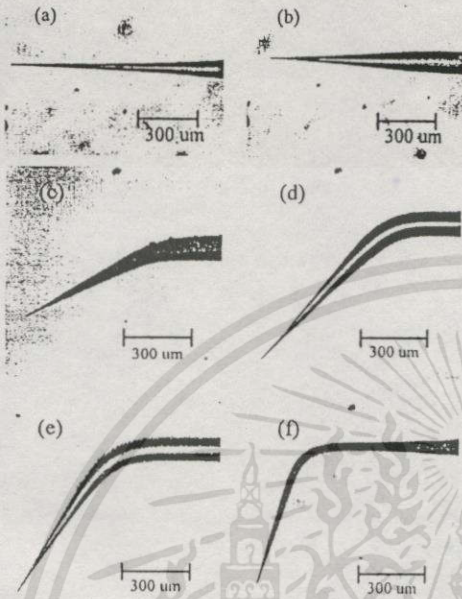


Fig.4 Photographs of straight fiber probes with taper lengths of (a) 1.1 mm and (b) 700 μm , and bent fiber probes with bent angles and lengths of (c) 27°, 650 μm , (d) 48°, 870 μm , (e) 60°, 900 μm , and (f) 75°, 620 μm . Note that the probes in (c) and (f) are coated with a thin Au film.

After a straight fiber probe was prepared, the electrodes were moved horizontally off the tip to the desired bending point. Also the fiber was translated closer to the positive electrode since the radius of arcing in the positive side was smallest compared to that in the middle or the negative side. The bent length, which was measured from the bending point to the tip, had to be larger than 500 μm . Otherwise the tip would be affected or damaged by the second arcing. The bent angle could be produced reliably by appropriate choice of the arcing duration. In Fig.4(c) to Fig.4(f), straight fiber probes prepared by the two cycle process were used to fabricate bent probes. The arcing duration, bent angle, and bent length for the three bent probes are (Fig.4(c)) 10 sec, 27°, 650 μm , (Fig.4(d)) 15 sec, 48°, 870 μm , (Fig.4(e)) 25 sec, 60°, 900 μm respectively. Increased arcing time did create larger bent angle, however, the bending point was damaged and the probe was ruined. With the use of straight probes with smaller diameters prepared by the one cycle process, higher bent angles could be generated. In Fig.4(f), the probe has a bent angle of 75° and a bent length of 620 μm . Because the diameter at the bending point was much smaller than that of previous probes, 2-sec arcing was sufficient to produce

the bend. Note that the probes in Fig.4(c) and Fig.4(f) were coated with a thin Au film.

After a bent fiber probe was fabricated, it was coated with a 20 nm Au film to increase the reflectivity for normal force detection. The probe was then glued to an Al plate measured 3.5 x 1.5 x 0.5 mm, which had a V-groove in the center for alignment. As a consequence the cantilevered probe could be easily fit into an AFM tip holder.

The photograph of a cantilevered probe made from the bent probe shown in Fig.4(f) is displayed in Fig.5(a), where the cantilever length measured from the bending point to the edge of the Al plate is around 800 μm . The vibration amplitude as a function of frequency is also plotted Fig.5(b), which was measured on a Multimode Nanoscope III AFM made by Digital Instruments. The resonance peak at 99.8 kHz has an approximate quality factor of 100, and was chosen for the tapping mode AFM measurement. In Fig. 6, 5 x 5 μm images of topography and phase of 500 nm polystyrene spheres on a glass slide are presented. The resolution in topography is better than 100 nm, which is comparable to the reported resolution in the SNOM research

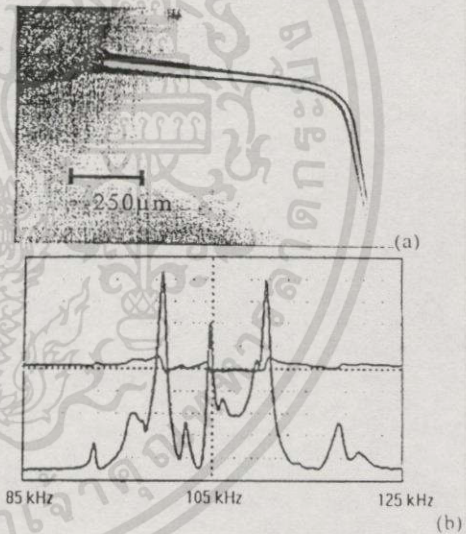


Fig.5 (a) Photograph of a cantilevered fiber probe made with the bent probe shown in Fig. 4(f), and (b) its vibration amplitude (the curve with larger variation) versus frequency plot. The cantilever length is around 800 μm . The second curve in the frequency response is the phase plot.

4. Conclusion

In conclusion, a homemade electric arc puller capable of producing near-field optical fiber probes with controllable bent angles and lengths has been presented.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

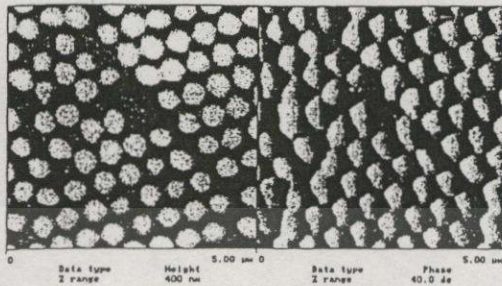


Fig. 6 5 x 5 μm tapping mode AFM images of topography (left) and phase (right) of 500 nm polystyrene spheres on a glass slide obtained with the probe shown in Fig. 5.

These bent probes can be easily made into cantilevered type probes, which greatly reduce the construction labor of modifying a dynamic AFM into a SNOM. The tapping mode AFM measurement shows the usefulness of the probes. Although the success rate achieved at present time is only 20%, the puller is low-cost and easy to be constructed. Also the spring constants for the cantilevered probes can be tuned by changing the cantilever length, which is especially useful for the study of mechanical properties of thin films at the nanometer scale.

5. References

- 1) E. Betzig and J. K. Trautman, *Science* **257**, 189 (1992).
- 2) D. W. Pohl and D. Courjon, *Near Field Optics*, NATO ASI Series (Kluwer, Dordrecht, 1993).
- 3) M. A. Paesler and P. J. Moyer, *Near-Field Optics* (Wiley, New York, 1996).
- 4) E. Betzig, P. L. Finn, and J. S. Weiner, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 2484 (1992).
- 5) R. Toledo-Crow, P. C. Yang, Y. Chen, and M. Vaez-Irarani, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 2957 (1992).
- 6) K. Karrai and R. D. Grober, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 1842 (1995).
- 7) J. W. P. Hsu, M. Lee, and B. S. Deaver, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 3177 (1995).
- 8) N. Chiba, H. Muramatsu, T. Ataka, and M. Fujihira, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, 321 (1995).
- 9) A. Lewis, K. Lieberman, N. Ben-Ami, G. Fish, E. Khachatryan, U. Ben-Ami, and S. Shalom, *Ultramicroscopy* **61**, 215 (1995).
- 10) H. Muramatsu, N. Chiba, K. Homma, K. Nakajima, T. Ataka, S. Ohta, A. Kusumi, and M. Fujihira, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 3245 (1995).
- 11) C. E. Talley, G. A. Cooksey, and R. C. Dunn, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 3809 (1996).
- 12) D. P. Tsai and W. K. Li, *J. Vac. Sci. Technol. A* **15**, 1427 (1997).
- 13) D. P. Tsai and W. R. Guo, *J. Vac. Sci. Technol. A* **15**, 1442 (1997).
- 14) M. Garcia-Parajo, T. Tate, and Y. Chen, *Ultramicroscopy* **61**, 155 (1995).
- 15) G. A. Valaskovic, M. Holton, and G. H. Morrison, *Appl. Opt.* **34**, 1215 (1995).

ประวัติผู้เขียน

นายอุดม ลีวลมไพศาล เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤศจิกายน 2511 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมต้นที่โรงเรียนวัดสุทธิวราราม และศึกษาต่อระดับ ปวช. ที่วิทยาลัยอาชีวศึกษาวิทยาเขตพระนครเหนือ และเข้ารับการ studia ต่อที่ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ เป็นเวลา 2 ปี และเข้ารับการ ศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ (วัดคุมหางอุตสาหกรรม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง จนสำเร็จการศึกษาใน ปีการศึกษา 2535 และได้เข้าทำงานเป็นผู้ช่วยนักวิจัย ประจำห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ เป็นเวลา 4 ปี และได้รับทุนจากประเทศไต้หวัน เป็นเวลา 10 เดือน ไปร่วมวิจัยในตำแหน่ง Guest Researcher ประจำห้องปฏิบัติการ SAL ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยนักวิจัย 2 ประจำห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และระบบอัตโนมัติ

