



สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษารูปธรรมทางแสงและการประยุกต์

นาย คำรณ เกตุรา

นาย หัตถกร รัตนวิภาค

ร.ท.

๑๓๕๖๗

๒๕๓๖

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี.....

61253716

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536/

PHOTONIC DEVICES AND APPLICATIONS

Mr. Khamron Phetra

Mr. Hattakorn Ratanawipak

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirement for the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1993

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาอุปกรณ์ทางแสงและการประยุกต์

โดย นาย คำรณ เกตุรา

นาย หัตถกร รัตนวิภาค

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

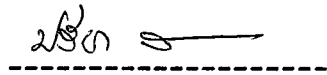
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ปรีชา สุพาพิน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวรรณ คูสำราญ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

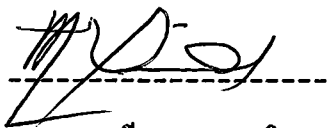
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้แนบโครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ

ศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์)



ประธานกรรมการ

( ดร. ปรีชา สุพาพิน )

-----

กรรมการ

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวรรณ คูสำราญ )

-----

กรรมการ

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนพนธ์ สรงประภา )

-----

กรรมการ

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาค )

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาอุปกรณ์ทางแสงและการประยุกต์
โดย	นาย คำรณ เกตรา นาย ทิตถกร รัตนวิภาค
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ปรีชา สุพาพิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวรรณ คูสำราญ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2536

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาอุปกรณ์ทางแสง โดยศึกษาถึงอุปกรณ์หลักสำหรับการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง คือ แหล่งกำเนิดแสง เส้นใยนำแสง ตัวตรวจจับ การศึกษาคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสง ในโครงการนี้ได้ศึกษาแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ เช่น แอล อี ดี เลเซอร์ไดโอด โดยแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ส่วนการศึกษาคุณสมบัติของตัวตรวจจับ แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างจุดต่าง ๆ บนพื้นผิวตัวตรวจจับกับแรงดัน จากคุณสมบัติของอุปกรณ์ดังกล่าว นำมาประยุกต์เป็นระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง ประกอบกับการประมวลสัญญาณ เช่น การมอดคูเลชัน ดิมอดคูเลชัน ก็จะได้ระบบสื่อสารที่เป็นพื้นฐานในการศึกษา และพัฒนาต่อไปในอนาคต



### กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการพิเศษ เรื่องการศึกษาอุปกรณ์ทางแสงและการประยุกต์ใช้ ถ้าจะเป็นประโยชน์แก่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์และคณะวิทยาศาสตร์ แห่งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังแล้ว ผู้เสนอโครงการพิเศษขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การสนับสนุนการศึกษามาโดยตลอด และอาจารย์ผู้แนะนำให้ค่าปรึกษา เพื่อให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ดังมีรายนามดังต่อไปนี้

ดร. ปรีชา สุพานิน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ  
ผศ. สุวรรณ คูสำราญ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ  
ผศ. อนุพงศ์ สรวงประภา ปรึกษาให้ค่าปรึกษา  
อาจารย์ สนิท หมอกมิต ปรึกษาให้ค่าปรึกษา และ สนับสนุนเครื่องมือ

รวมทั้งกระทรวงวิทยาศาสตร์ที่อนุมัติงบประมาณในการทำวิจัยครั้งนี้

นอกจากบุคคลต่าง ๆ ที่กล่าวแล้ว ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลงด้วยดี ทางผู้เสนอขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

## สารบัญ

บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ง
สารบัญรูป.....	จ
บทที่ 1 บทนำ	
บทนำ .....	1
บทที่ 2 ระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์	
2.1 แหล่งกำเนิดแสง	
2.1.1 Light Emitting Diode .....	3
2.1.2 คุณสมบัติและการทำงานของไดโอดเปล่งแสง .....	5
2.1.3 ตัวกำเนิดแสงอินฟราเรด .....	7
2.1.4 เลเซอร์ไดโอด .....	8
2.1.5 แกลเลียมอาร์เซไนด์ และแกลเลียมอัลลูมิเนียมอาร์เซไนด์ เลเซอร์ ..	9
2.2 วงจรรับ .....	13
2.3 อุปกรณ์รับแสง	
2.3.1 โฟโตดีเทคเตอร์ .....	14
2.3.2 อุปกรณ์รับแสงชนิดสารกึ่งตัวนำ .....	15
2.3.3 พีไอเอ็น โฟโตไดโอด .....	17
2.3.4 อะวาแลนซ์ โฟโตไดโอด .....	18
2.4 วงจรอุปกรณ์รับแสง .....	18

### บทที่ 3 เส้นใยนำแสง

#### 3.1 หลักการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง

3.1.1 ปรากฏการณ์พื้นฐานของแสง ..... 21

3.1.2 การเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง ..... 30

3.1.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงคุณสมบัติของเส้นใยนำแสง ..... 47

#### 3.2 ชนิดของเส้นใยนำแสง

3.2.1 โครงสร้างของเส้นใยนำแสง ..... 58

3.2.2 ชนิดของเส้นใยนำแสง ..... 59

3.3 การสูญเสียแสง ..... 66

3.4 ความแตกต่างระหว่างเส้นใยนำแสงกับเคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำ .... 75

### บทที่ 4 มอดดูเลชัน

4.1 การมอดดูเลชัน ..... 82

4.2 การรับและการโพรมอเซสสัญญาณ ..... 84

4.3 การประยุกต์และการนำไปใช้ ..... 85

### บทที่ 5 การดำเนินการและสรุปผล

อุปกรณ์ในการปฏิบัติการ ..... 86

ปฏิบัติการที่ 1 ..... 97

ปฏิบัติการที่ 2 ..... 103

ปฏิบัติการที่ 3 ..... 109

### เอกสารอ้างอิง

## สารบัญตาราง

### ตาราง

ตารางที่ 2.1	แสดง แอล อี ดี ที่ทำจากสารชนิดต่าง ๆ .....	6
ตารางที่ 2.2	แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง แอล อี ดี และ เลเซอร์ไดโอด ....	13
ตารางที่ 2.3	ตารางเปรียบเทียบตัวรับแสงชนิดต่าง ๆ .....	20
ตารางที่ 3.1	แสดงการดูดกลืนแสงอันเนื่องมาจาก OH-BASE ของแก้วซิลิกา .....	70
ตารางที่ 3.2	คุณสมบัติทางนิสิกส์ของแก้ว (ซิลิกา) .....	78

## สารบัญรูป

### รูป

รูปที่ 2.1	แสดงลักษณะของ แอล อี ดี และระดับพลังงาน .....	3
รูปที่ 2.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังและกระแส ของไดโอดเปล่งแสง ....	5
รูปที่ 2.3	แสดงถึงย่านของคลื่นแสงที่ตามองเห็น .....	7
รูปที่ 2.4	แสดงการเกิดเลเซอร์ .....	8
รูปที่ 2.5	แสดงกราฟการลดทอนของเส้นใยนำแสงในย่านความยาวคลื่นต่าง ๆ ...	11
รูปที่ 2.6	แสดงโครงสร้างของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ .....	11
รูปที่ 2.7	แสดงระดับพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน .....	12
รูปที่ 2.8	แสดงลักษณะของ Rise Time .....	15
รูปที่ 2.9	แสดงคุณสมบัติของสารพีเอ็น .....	16
รูปที่ 2.10	แสดงลักษณะของพีไอเอ็น โฟโตไดโอด .....	17
รูปที่ 2.11	แสดงวงจร Photodiode ใน Photovoltaic mode .....	18
รูปที่ 3.1	แสดงแสงที่ทะลุผ่านและสะท้อนกลับ .....	21
รูปที่ 3.2	แสดงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังและสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ของกำลังที่ขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบ	24
รูปที่ 3.3	แสดงปรากฏการณ์ การแทรกสอดของแสง .....	27
รูปที่ 3.4	แสดงปรากฏการณ์เบี่ยงเบนของแสง .....	29
รูปที่ 3.5	แสดงการเบี่ยงเบนของแสง .....	30
รูปที่ 3.6	แสดงการเบี่ยงเบนของแสงที่ปล่อยออกจากเส้นใยนำแสง .....	30
รูปที่ 3.7	แสดงความคล้ายคลึงกันของเส้นใยนำแสงแบบระนาบที่ดูจากหน้าตัด .... ในแนวตั้ง	31
รูปที่ 3.8	แสดงการเดินทางของแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับไปกลับมา .....	32
รูปที่ 3.9	แสดงการกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในสายนำแสง .....	34
รูปที่ 3.10	แสดงการกำหนด Mode Number .....	35
รูปที่ 3.11	แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าในแนวขวางของโหมดของการแพร่ ...	36

รูปที่ 3.12	แสดงความสัมพันธ์ของ Normalized Frequency กับ $\rho/k$ .....	39
รูปที่ 3.13	แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Single Mode กับ Multimode .....	41
	Optical fiber	
รูปที่ 3.14	แสดงการเปลี่ยนโหมดที่เกิดขึ้นตรงส่วนโค้งของเส้นใยนำแสง .....	42
รูปที่ 3.15	แสดงการเปลี่ยนโหมดที่เกิดขึ้นที่รอยต่อขรุขระของ Core และ .....	43
	Cladding	
รูปที่ 3.16	แสดงการเปลี่ยนโหมดที่เกิดจากแกนไม่ตรงกัน .....	43
รูปที่ 3.17	แสดงการกระจายค่าดัชนีหักเหของเส้นใยนำแสง .....	44
รูปที่ 3.18	แสดงการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแบบ Graded Index Type.	46
รูปที่ 3.19	แสดงลำแสงสำหรับโหมดของการแพร่แต่ละอัน .....	46
รูปที่ 3.20	แสดงความแตกต่างของค่าดัชนีหักเห .....	49
รูปที่ 3.21	แสดงมุมรับแสง .....	49
รูปที่ 3.22	แสดงค่าจำกัดความของ NA .....	51
รูปที่ 3.23	แสดงวิธีป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงอย่างมีประสิทธิภาพ .....	52
รูปที่ 3.24	แสดงการต่อเส้นใยนำแสงและ NA .....	52
รูปที่ 3.25	แสดงรูปร่างการกระจายของค่าดัชนีการหักเห .....	53
รูปที่ 3.26	แสดงโครงสร้างหน้าตัดและพารามิเตอร์โครงสร้างของเส้นใยนำแสง ..	54
รูปที่ 3.27	แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง .....	58
รูปที่ 3.28	แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง .....	61
รูปที่ 3.29	แสดงโครงสร้างเส้นใยนำแสง Multimode Graded Index .....	62
รูปที่ 3.30	แสดงเส้นใยนำแสงแบบ Single Mode .....	63
รูปที่ 3.31	แสดงเส้นใยนำแสง Plastic-Clad แบบ Step Index .....	65
รูปที่ 3.32	แสดงปรากฏการณ์แตกกระจายของแสงโดยบรรยากาศ .....	66
รูปที่ 3.33	แสดงปรากฏการณ์คู่ดง .....	68
รูปที่ 3.34	แสดงการสูญเสียจากการดูดแสงของไอออนต่าง ๆ .....	69
รูปที่ 3.35	แสดงการเกิดการสูญเสียจากโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ .....	71
รูปที่ 3.36	แสดงคุณสมบัติการสูญเสียของเส้นใยนำแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ .....	73

รูปที่ 3.37	แสดงประวัติการลดการสูญเสียของเส้นใยนำแสง .....	73
รูปที่ 3.38	แสดงรอยขีดของเส้นใยนำแสงและแรงดัน .....	78
รูปที่ 3.39	แสดงความน่าจะเป็นของการหักของเส้นใยนำแสง .....	79
รูปที่ 3.40	แสดงผลของการ Coating .....	80
รูปที่ 3.41	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความน่าจะเป็นของการแตกหักกับความยาว ของเส้นใยนำแสง	81
รูปที่ 4.1	แสดงการรวมกันของคลื่น .....	83
รูปที่ 4.2	แสดงฟังก์ชันของความต่างศักย์ในการมอดคูเลต .....	84
รูปที่ 4.3	แสดงการเปลี่ยนเฟสในช่วง Delay Time .....	85
รูปที่ 5.1	แสดง แอล อี ดี .....	86
รูปที่ 5.2	แสดง เลเซอร์ไดโอด .....	87
รูปที่ 5.3	แสดงอุปกรณ์ติดตั้งเลเซอร์ไดโอด .....	88
รูปที่ 5.4	แสดงภาพการติดตั้งเลเซอร์ไดโอด .....	88
รูปที่ 5.5	แสดงวงจรขับ .....	89
รูปที่ 5.6	แสดงอุปกรณ์ขับเลเซอร์ไดโอด .....	89
รูปที่ 5.7	แสดงหน้าที่และฟังก์ชันของอุปกรณ์ขับเลเซอร์ไดโอด .....	90
รูปที่ 5.8	แสดงลักษณะแผ่นโพลารไรซ์ .....	91
รูปที่ 5.9	แสดงเลนส์รวมแสง .....	91
รูปที่ 5.10	แสดงแป้นยึดจับแบบปรับได้ 2 มิติ .....	92
รูปที่ 5.11	แสดงเส้นใยนำแสงชนิด พลาสติก .....	92
รูปที่ 5.12	แสดงการวางอุปกรณ์เพื่อนำแสงเข้าสู่อุปกรณ์รับแสง .....	93
รูปที่ 5.13	แสดงอุปกรณ์รับแสง .....	93
รูปที่ 5.14	แสดงวงจรขับอุปกรณ์รับแสง .....	94
รูปที่ 5.15	แสดงวงจรจ่ายไฟกระแสตรง บวก ลบ 12 โวลต์ .....	94
รูปที่ 5.16	แสดงอุปกรณ์รับแสงรวมกับวงจรในชุดเดียวกัน .....	94
รูปที่ 5.17	แสดงลักษณะกระจกสะท้อนแสง .....	95
รูปที่ 5.18	แสดงแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบดิจิทัล .....	95

รูปที่ 5.19	แสดงภาพออสซิลโลสโคป .....	96
รูปที่ 5.20	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด และ แอล อี ดี ....	98
รูปที่ 5.21	แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในปฏิบัติการที่ 1 .....	99
รูปที่ 5.22	กราฟแสดงผลคุณสมบัติของ แอล อี ดี ที่ใช้ในปฏิบัติการที่ 1 .....	100
รูปที่ 5.23	กราฟแสดงผลคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด ที่ใช้ในปฏิบัติการที่ 1 .....	101
รูปที่ 5.24	แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในปฏิบัติการที่ 2 .....	104
รูปที่ 5.25	แสดงแท่นปรับระดับ 3 มิติ .....	105
รูปที่ 5.26	แสดงผลในปฏิบัติการที่ 2 .....	106
รูปที่ 5.27	แสดงความสามารถในการรับแสงที่จุดต่าง ๆ บนอุปกรณ์รับแสงในแนว..	107
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	
รูปที่ 5.28	แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในปฏิบัติการที่ 3 .....	110
รูปที่ 5.29	แสดงสัญญาณที่มอดูเลตและสัญญาณป้อนกลับ .....	111

## บทที่ 1

### บทนำ

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีของเส้นใยนำแสงได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้น ทั้งทางด้านการสื่อสาร อุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์รวมวงจรออปติก ดังนั้นระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจศึกษาถึงอุปกรณ์หลักต่าง ๆ ซึ่งอุปกรณ์หลักสำหรับการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนั้นประกอบด้วย

- ตัวส่ง (Light Source)
- ตัวกลาง (Fiber Optic)
- ตัวรับ (Detector)

และยังประกอบด้วยส่วนอื่น ๆ อีก เช่น การประมวลสัญญาณซึ่งอาจประกอบด้วย การมอดดูเลชั่น-ดีมอดดูเลชั่น การเอนโคด-ดีโคด การขยายสัญญาณ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อดีของเส้นใยนำแสงเช่น มีขนาดเล็กและเบา ใช้ได้กับย่านความถี่ที่กว้างมาก ๆ ไม่มีการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและปัญหาจากกราวด์ลูป (ground loop) โครงสร้างของสายสามารถโค้งงอได้โดยไม่มีผลกระทบต่อการส่งสัญญาณ ไม่ขึ้นกับความแปรปรวนของดินฟ้าอากาศขณะใช้งาน และยังเหมาะสำหรับใช้ทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระเป๋าหัว (Portable) หรือระยะไกล (Remote sensing)

จากข้อดีข้างต้น เราสามารถนำการสื่อสารด้วยแสงผ่านเส้นใยนำแสงไปใช้ได้หลายอย่างเช่น สามารถวางเส้นใยนำแสงขนานไปกับสายไฟฟ้าแรงสูงได้ ซึ่งถ้าเป็นสายเคเบิลจะทำไม่ได้ เพราะจะมีการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมาก หรือสามารถนำสายผ่านอุโมงค์เหมืองได้เนื่องจากมีขนาดเล็กและไม่มีการสปาร์ค (Spark) นอกจากนี้น้ำหนักที่เบาก็ยังสามารถใช้เป็นสายสื่อสารภายในเครื่องบินได้ด้วย สำหรับการใช้ในการติดต่อสื่อสารในปัจจุบันมีดังนี้

1. ใช้เป็นสายเคเบิลทีวี
2. ใช้ในยานพาหนะต่าง ๆ เช่น เครื่องบิน
3. ใช้เชื่อมต่อสัญญาณข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์
4. ใช้สื่อสารในพื้นที่ที่มีอันตราย เช่น ในถังน้ำมัน
5. ใช้เชื่อมต่อข้อมูลระหว่างบริษัทที่อยู่ในตึกเดียวกัน
6. ใช้ในองค์การโทรศัพท์
7. ใช้ในระบบการสื่อสารใต้น้ำ

สำหรับการสูญเสียในการสื่อสารโดยใช้แสงผ่านเส้นใยนำแสง ก็จะมีการสูญเสียที่  
รอสต่อต่าง ๆ ของระบบ การสูญเสียขณะที่แสงเดินทางในเส้นใยนำแสง การที่จะทำให้  
ระบบการสื่อสารชนิดนี้มีประสิทธิภาพตามที่ตั้งไว้ได้ ก็น่าจะเป็นผลมาจากความสัมพันธ์ของ  
อุปกรณ์ดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ควรจะศึกษาคุณสมบัติเหล่านี้ของอุปกรณ์  
การสื่อสารเส้นใยนำแสง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ และพัฒนาให้เกิด  
คุณประโยชน์ต่อไปในอนาคต

## บทที่ 2

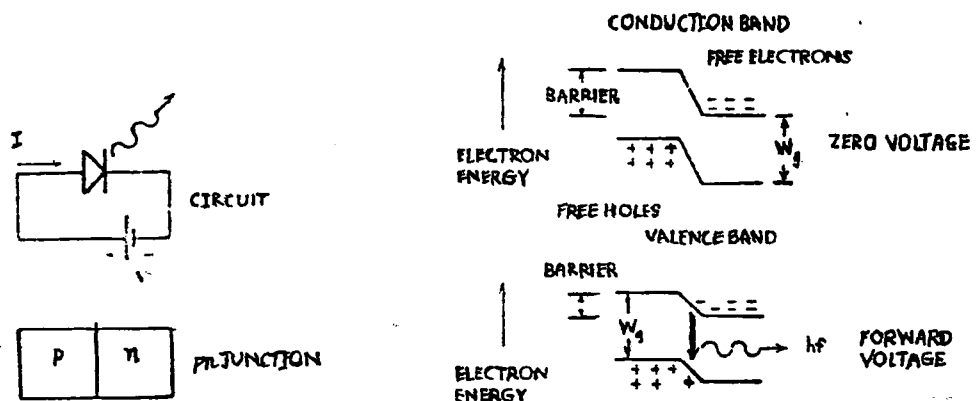
### ระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์

#### (Optoelectronics System)

#### 2.1 แหล่งกำเนิดแสง

##### 2.1.1 LIGHT EMITTING DIODE (LED)

LED เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด PN-JUNCTION ซึ่งจะแสดงออกมาเมื่อทำการให้ไบอัสทางตรง ดังรูป 2.1 จากรูป 2.1 (b) แสดงจังก์ชัน (JUNCTION) และ แถบพลังงาน (ENERGY BAND) ของ แกบไดโอด (DIODE BAND) ทั้งสองจะถูกแบ่งโดย FORBIDDEN REGION (BAND GAP) ซึ่งมีความกว้าง  $W_g$  ในระดับพลังงานล่างเรียกว่า แถบวาเลนซ์ (VALENCE BAND) ซึ่งอนุภาค โฮลอิสระ (FREE HOLE) สามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของ LED และระดับพลังงาน

สารกึ่งตัวนำชนิด n- TYPE จะมีจำนวน free electron อยู่มาก และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-TYPE) จะมีอนุภาคโฮลอิสระอยู่มาก เมื่อนำสารทั้ง 2 มาวางเข้าไว้ด้วยกัน จะทำให้เกิด ENERGY BARRIER อิเล็กตรอนอิสระในบริเวณเอ็น (N-JUNCTION) จะไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้าม ENERGY BARRIER ไปยังบริเวณพี (P-JUNCTION) ได้ ในกรณีของอนุภาคโฮลอิสระ ในบริเวณพี ก็เช่นกัน

เมื่อเราไม่มีการป้อนโวลเตจให้กับ ไดโอด (DIODE) จะไม่มีการเคลื่อนที่ของประจุภายในพีเอ็นจังก์ชัน (PN-JUNCTION) แต่ถ้าเราป้อนโวลเตจให้กับไดโอด โดสให้ไบอัสทางตรง จะไปลด ENERGY BARRIER เพิ่มพลังงานศักย์ให้กับทางด้านเอ็น (n) และลดระดับพลังงานศักย์ทางด้านพี (p) ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระ และ โฮลอิสระ จะมีพลังงานเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่าน JUNCTION REGION เมื่ออิเล็กตรอนอิสระรวมกับ โฮลอิสระ อิเล็กตรอนจะตกลงในแถบวาเลนซ์ และรวมกับโฮล การรวมกันของอิเล็กตรอนกับโฮล จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานแสงออก (OPTIC ENERGY) ซึ่งมีความสัมพันธ์ของพลังงานโฟตอนกับความถี่แสดงดังสมการ (2.2)

$$W = hf \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$= he/W_x \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

สมการ 2.2 นี้ ค่าของ  $W_x$  (ENERGY GAP) มีหน่วยเป็น JOULE ความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นเมตร นั่นคือ

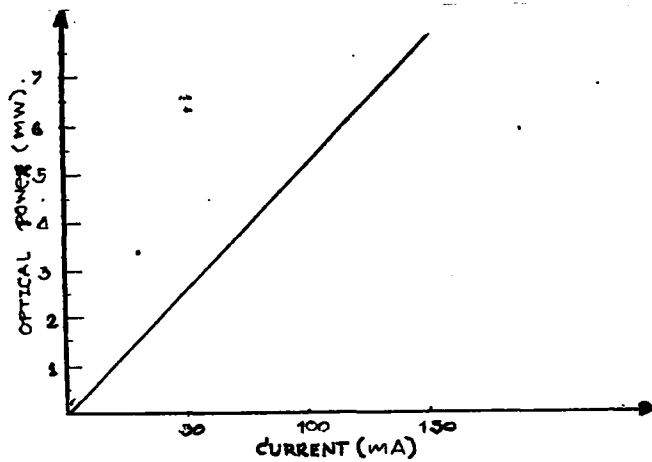
$$W = 1.24/W_x \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

สมการที่ 2.3 นี้  $W_x$  มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอน-โวลต์ (eV) และความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นไมโครเมตร ( $\mu_m$ )

วัสดุและโลหะผสมที่ต่างกันจะให้ค่าของ BANDGAP ENERGY ที่ต่างกัน ตาราง 2.1 แสดง COMMONEMITTER MATERIAL OPERATION WAVE LENGTH และค่าประมาณของ BANDGAP ENERGY จากตาราง 2.1 สารซิลิกอนจะไม่มีเพราะโฮลและอิเล็กตรอนไม่สามารถรวมกันได้โดยตรงทำให้จัดเป็นสาร INEFFICIENT EMITTER

### 2.1.2 คุณสมบัติและการทำงานของไดโอดเปล่งแสง (LIGHT-EMITTING DIODE OPERATING CHARACTERISTICS)

เพาเวอร์ที่เกิดจากไดโอดเปล่งแสง เป็นสัดส่วนตรงกับกระแส ที่ใช้ขับไดโอดเปล่งแสง จากรูปที่ 2.2 แสดงถึงความสัมพันธ์ กำลังกับกระแส โดยที่กระแสที่ฉีดให้กับ แอล อี ดี นั้นเป็นประจุต่อเวลาจำนวนประจุ (N) นั้นเท่ากับ  $i/e$  เมื่อ  $e$  เป็นขนาดของประจุแต่ละตัว และ  $i$  เป็นกระแสที่ฉีดให้กับไดโอดเปล่งแสง ถ้า  $y$  เป็นเศษส่วนของประจุที่สามารถรวมตัวแล้วทำให้เกิด โฟตอน (PHOTON) ขึ้น



รูปที่ 2.2 POWER-CURRENT

คุณสมบัติของ แอล อี ดี

$$\text{เพาเวอร์เอาต์พุต (P)} = yNwg = yWg i/e$$

เมื่อ  $Wg = \text{GAP ENERGY (JOULES)}$

จากรูปที่ 2.2 เมื่อกำลังที่ส่งผ่านเส้นใยไม่เปลี่ยนแปลง ขีดจำกัดของกำลังที่ส่งในเส้นใยแสงนั้นอยู่ที่ NUMERICAL APERTURE ไดโอดเปล่งแสง (LED) ที่กระแสไหลผ่านตัวมัน 50-100 มิลลิแอมป์ แรงดันที่ใช้ประมาณ 1.2 ถึง 1.8 โวลต์

ตารางที่ 2.1 แสดง แอล อี ดี ที่ทำจากสารชนิดต่าง ๆ

Material	Band Gap Energy	Emission (nm)	Transition Type
Ge	0.66	1880	Indirect
Si	1.09	1140	Indirect
GaAs	1.43	910	Direct
Gap	2.24	560	Indirect
GaAs <sub>0.9</sub> P <sub>0.1</sub>	1.91	650	Direct
Al Sb	1.60	775	Indirect
In Sb	0.18	6900	Direct
Si c	2.2 - 3.0	563 - 413	Indirect

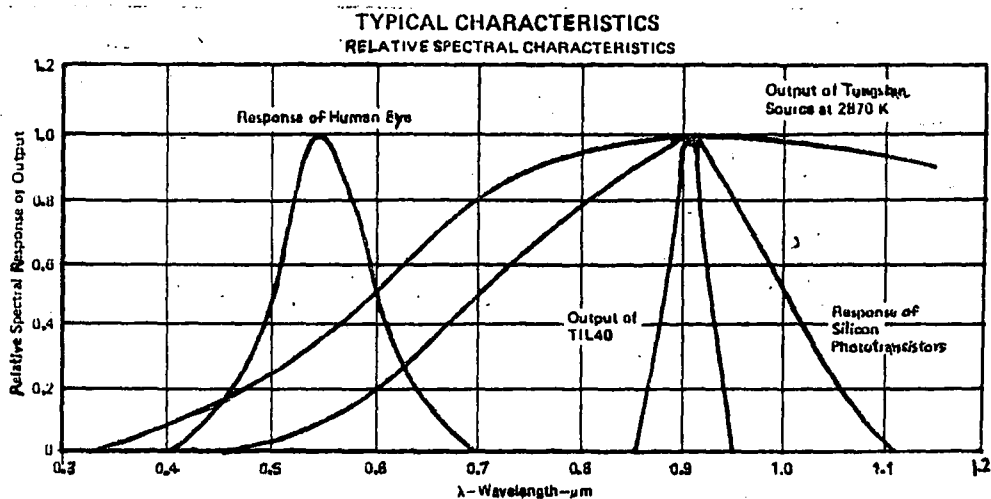
เป็นการแสดงถึง แอล อี ดี ชนิดต่าง ๆ ซึ่งใช้โฟตอน ที่มีความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ กัน และจะเห็นได้ว่า แอล อี ดี ที่สร้างจาก แกเลียมอาเซไนด์ (GaAs) จะให้คลื่นอยู่ในช่วง อินฟราเรด (infrared) ซึ่งมีค่าประมาณ 900 นาโนเมตร

### 2.1.3 ตัวกำเนิดแสงอินฟราเรด (infrared)

ลักษณะ อินฟราเรด แอล อี ดี ที่เหมือนกับ แอล อี ดี โดยทั่วไป คือ เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกโด๊ป (dope) โดยสารที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนต่างกัน โดยสารที่มีอิเล็กตรอน มากกว่าปกติจะเป็นชนิดเอ็น และสารที่มีอิเล็กตรอนน้อยกว่าปกติจะเป็นชนิดพี เมื่อสารทั้งสองชนิดมาต่อกัน จะทำให้มีการแบ่งกันระหว่างอิเล็กตรอนชั้น ทำให้เกิดความต่างศักย์ที่เรียกว่า potential Barrier ( $E_b$ ) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างของพลังงาน ดังนั้น อิเล็กตรอนจากด้านชนิดเอ็น จะเคลื่อนที่มายังด้านชนิดพี ซึ่งการรวมตัวกันนี้มีอยู่ 2 ลักษณะคือ Radiative process ซึ่งเมื่อรวมตัวกันแล้วจะมีพลังงานบางส่วนหายไปกับคู่อิเล็กตรอน (electron-pair) และกระจายออกมาเป็นโฟตอนถ้าเป็นแบบ Non-Radiative process พลังงานจะแสดงออกมาในรูปโฟตอนหรือความร้อน

### แถบย่านการตอบสนอง (Spectral Response)

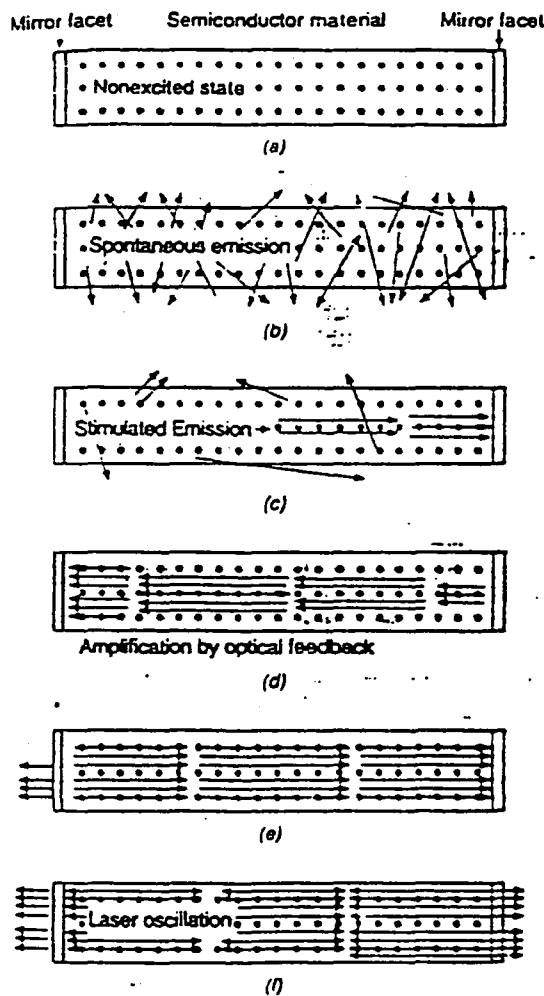
อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่แผ่พลังงานออกมาในย่านการมองเห็น และย่านอินฟราเรด ดังรูปที่ 2.3 แสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็น การแผ่ของคลื่นที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.4-0.76 ไมครอน และตามนุษย์เราสามารถตอบสนองในการมองเห็นแสงที่มีความยาวคลื่น 0.55 ไมครอน ที่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป และที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ 0.61 ไมครอน



รูปที่ 2.3 แสดงถึงย่านของคลื่นแสงที่ตามองเห็น

### 2.1.4 เลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดมีกำลังสูงส่งกว่ามากเมื่อเทียบกับ แอล อี ดี เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ชนิดที่ทำจากสารกึ่งตัวนำที่ให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 750 จนกระทั่งถึง 830 นาโนเมตร โดยใช้พลังงานจากผลึก GaAlAs (Gallium Aluminium Arsenide) ในสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ อัตราส่วนของ Ga:Al สามารถเปลี่ยนแปลงได้และจะส่งผลให้เกิดการลดเพิ่มขนาดของแถบพลังงานและความยาวคลื่นของแสงที่ออกมา การกำเนิดเลเซอร์ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้นั้น จะต้องมีการขยายสัญญาณและรวบรวมแสงที่สะท้อนไปกลับด้วย โดยทั่วไปการสั้นของเลเซอร์นี้จะเกิดจากการสะท้อนไปมาระหว่างแคววิตี



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดเลเซอร์

การเคลือบด้วยวิธีพิเศษนี้ เป็นการเพิ่มทั้งการสะท้อนและการทะลุผ่านของผิวกระจก เมื่อวัสดุสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็น resonator จะนำให้อยู่ในสภาวะประชากรผกผัน (population inversion) แสงที่เกิดจากการผลิตแบบ spontaneous emission จะมีการขยาย (amplified) โดยการสะท้อนกลับไปมา แสงซึ่งเปล่งออกในทิศทางที่ไม่ตั้งฉากกับผิวกระจก จะสะท้อนออกมาจากแคววี้ ดังรูปที่ 2.3

องค์ประกอบของการ spontaneous emission เหล่านี้จะเดินทางตั้งฉากกับผิวหน้ากระจก และสะท้อนกลับไปมาระหว่างกระจก ดังรูป 2.3 c แสงจะเดินทางทะลุผ่านไปมาในเนื้อของสารกึ่งตัวนำ และเกิดการขยายให้มีพลังงานมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีพลังงานมากพอ จึงเปล่งพลังงานออกมาทั้งหมดในคราวเดียวแสดงดังรูป 2.3d และ 2.3 e ในการสะท้อนแต่ละครั้งลำแสงบางส่วนทะลุผ่านผิวหน้าของแผ่นสะท้อน การสิ้นของอนุภาคของลำแสงเลเซอร์ เริ่มต้นเมื่อจำนวนแสงซึ่งถูกขยายให้มีพลังงานมากขึ้นมีค่าเท่ากับจำนวนที่สูญเสียในการทะลุผ่านตัว resonator ออกไปโดยทางกระจก หรือสูญเสียในการดูดซับของเนื้อสารที่ใช้สารกึ่งตัวนำ

#### 2.1.5 GaAs/Ga<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As Laser (Gallium-Aluminium-Arsenide laser)

เลเซอร์ GaAlAs หรือเลเซอร์ไดโอดมีลักษณะที่เป็นแบบ heterojunction โดยชั้น active คือชั้นที่เป็น GaAlAs จะถูกประกบด้วยชั้นที่เป็นชนิดพีและชนิดเอ็น (cladding) เมื่อป้อนความต่างศักย์แบบไบอัสไปข้างหน้า (forward bias) อิเล็กตรอนและโฮลจะเคลื่อนที่เข้าไปในชั้น active ทำให้เกิดกระแสไหลได้ตั้งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ความถี่ชั้น active มีดัชนีหักเหสูงมากเมื่อเทียบกับชั้น cladding ทำให้มันมีความสามารถในการรักษาแสงที่จะปลดปล่อยออกไว้ได้ การกักกันนี้เป็นสิ่งสำคัญที่สุดหรือเรียกได้ว่าเป็นหัวใจของเลเซอร์ไดโอดที่เดียว ถ้าแสงมีความยาวคลื่นเดินทางในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห  $n$  เงามโซของ standing wave ในตัวกลางมีค่าเท่ากับ  $\lambda/2$  โดยเงามโซนี้สามารถหาได้โดยตัวคูณรวม (integral multiple)  $Q$  ของครึ่งคลื่นจะมีค่าเท่ากับความยาวของ resonator ( $L$ ) ดังนี้

$$L = Q \times (\lambda/2n)$$

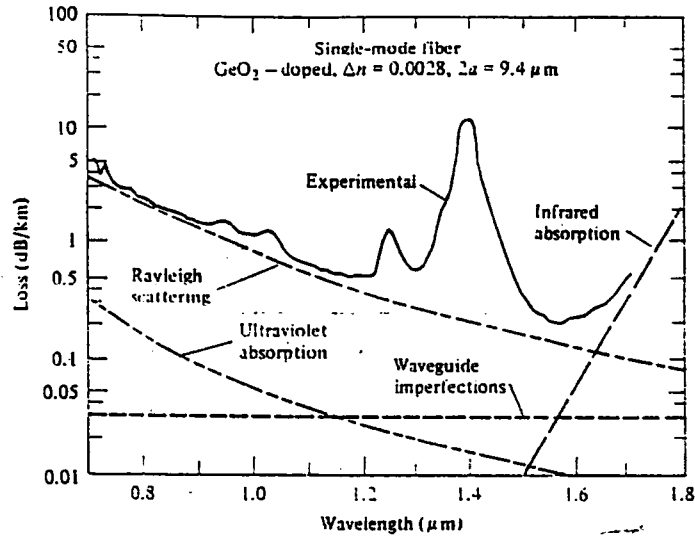
โดยที่ L คือ ความยาวของ resonator

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

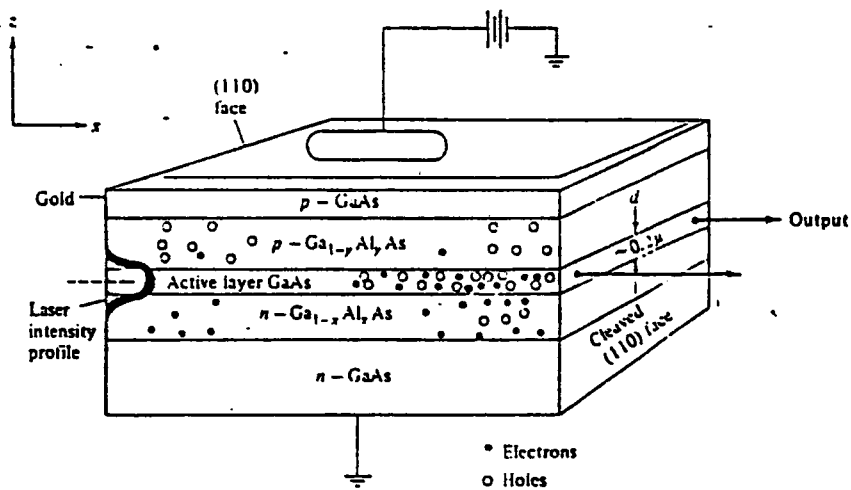
n คือ ดัชนีหักเห

ตัวอย่างเช่น  $\lambda = 780$  นาโนเมตร  $n = 3.5$   $L = 250$  ไมครอน จะได้ค่า Q ประมาณ 2243 เมื่อ Q เปลี่ยนไป 1 ทำให้มีค่าเปลี่ยนไป 0.35 นาโนเมตร ในเลเซอร์ไดโอด การเกิดเลเซอร์ออสซิลเลชัน (laser oscillation) ที่ต่อเนื่องกันทำให้เกิดอัตราการขยายสูงสุด เมื่อความกว้างของแถบพลังงานเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ การออสซิลเลชันก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย สำหรับ GaAlAs เลเซอร์ไดโอด ความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าประมาณ 0.23 นาโนเมตร ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเลเซอร์ ที่เกี่ยวข้องกับธาตุหมู่ที่ 3 ที่สำคัญมี 2 แบบ คือ แบบ GaAs และ  $Ga_{1-x}Al_xAs$  โดยที่ x คือ จำนวนอะตอมของอะตอมของ Ga ใน GaAs สเปกตรัมที่เลเซอร์ชนิดนี้ปล่อยออกมามีความยาวคลื่นระหว่าง 750 นาโนเมตร ถึง 880 นาโนเมตร อีกระบบหนึ่งเป็นระบบที่มีธาตุ  $Ga_{1-x}In_xAs_{1-y}P_y$  ใน active region เลเซอร์ชนิดนี้ปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 1100 นาโนเมตร ถึง 1600 นาโนเมตร ขึ้นอยู่กับค่า x และ y ในย่าน 1550 นาโนเมตร เป็นย่านที่ใช้งานบ่อยมาก ในรูป 2.4 อัตราการสูญเสียจะมีน้อยมาก (ประมาณ 0.15 dB/km) ทำให้สามารถใช้งานที่ความยาวคลื่นนี้ได้ในการสื่อสารระยะทางไกล



รูปที่ 2.5 แสดงกราฟการลดทอนของเส้นใยในย่านความยาวคลื่นต่าง ๆ



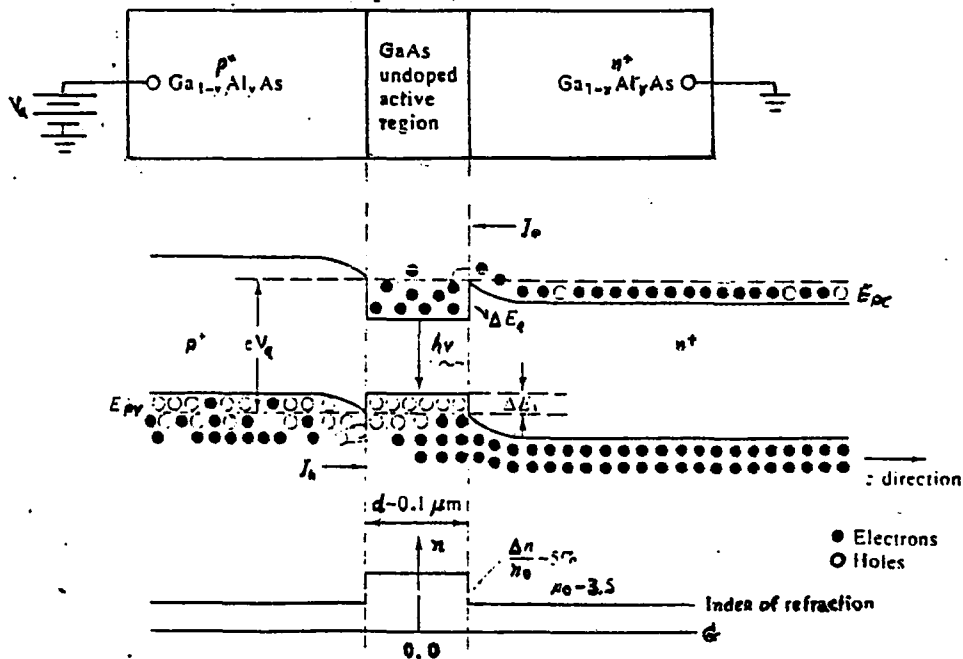
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ

จะศึกษาเฉพาะ GaAs และ  $Ga_{1-x}Al_xAs$  เท่านั้น จากรูป 2.5 มีความหนาประมาณ 0.1-0.2 ไมครอน ในช่วงที่เป็น GaAs โดยทั้งสองข้างที่เป็น GaAlAs นั้นเรียกโครงสร้างนี้ว่า double heterostructure laser โครงสร้างชั้นพื้นฐาน

ของเลเซอร์สร้างได้โดยวิธีอีพิแทกเซียล (epitaxial) บนผลึกของ GaAs ซึ่งใช้เป็น substrate ส่วน active ที่มีความบางนี้ โดยปกติจะไม่มีสารโด๊ป (doping) ขณะที่ในส่วน  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ถูกโด๊ปอย่างหนักทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น โดย

$$n_{GaAs} - n_{Ga_{1-x}Al_xAs} = 0.62 X \dots\dots\dots(2.4)$$

การกระจายดัชนีหักเหและโครงสร้างของพลังงาน แสดงดังรูป 2.6 เมื่อให้ forward bias กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะออกจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นใน  $Ga_{1-x}Al_xAs$  เข้าไปใน active region ขณะที่ความหนาแน่นของโฮลมีค่าเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนใน active region ที่มีจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนที่เข้ามาใน active region จะต้องเอาชนะกำแพงศักย์ (potential barrier) ที่มีค่าเท่ากับความต่างของช่องว่างแถบพลังงาน ( $\Delta E_x$ ) ของ GaAs และ  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ค่า  $x$  ขึ้นอยู่กับช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_x$ ) โดย  $E_x (x < 0.37) = (1.424 + 1.247x) \text{ eV}$



รูปที่ 2.7 แสดงระดับพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap)

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง LED และ Laser Diode

	Laser diode	LED
Output power(mW)	1 - 10	1 - 10
Power launched into fibre(mW)	0.5 - 5	0.03 - 0.3
Spectral width(rms value)nm	2 - 4	15 - 60
Brightness(w/cm <sup>2</sup> /sr)	~ 10 <sup>5</sup>	10 - 10 <sup>3</sup>
Rise time,10-90% (ns)	<= 1	2 - 20
Frequency response(-30dB,MHz)	> 500	< 200
Voltage drop(Volt)	1.5 - 2	1.5 - 2.5
Forward current(mA)	10 - 300	50 - 300
Threshold current(mA)	5 - 250	-
Feedback Stabilization request	YES	NO

## 2.2 วงจรขับ (driver)

เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำที่มีปัญหาเกี่ยวกับความร้อน และความสามารถในการตอบสนองพัลส์เล็ก ๆ (short pulse) เป็นอย่างยิ่งเนื่องจากการสร้างเลเซอร์ไดโอดนั้นจะมีสารประกอบ GaAl ขึ้นมาก่อนแล้วทำการเติม As ลงภายหลัง สิ่งเหล่านี้เองที่ก่อให้เกิดกำลัง (power output) เนื่องจากพลังงานศักย์ทำให้เกิดกระแสเป็นจำนวนมาก ทำให้ไดโอดชนิดสแตตนั้นไม่สามารถที่จะรับพลังงานอย่างต่อเนื่องได้

ข้อสำคัญคือ ไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำจะต้องได้รับกระแสที่คงที่ ค่ากระแสที่คงที่นี้จะต้องไม่เกินค่าสูงสุดที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้ จุดทำงาน (operating point) ของเลเซอร์ไดโอดในระหว่างการมอดูเลต (Modulation) จะต้องทำให้เกิดกำลังสูงสุดของไดโอดในการปล่อยพลังงานออกมากที่สุด โดยที่ไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหาย แบตเตอรี่ (batteries) เป็นแหล่งพลังงานที่สามารถจ่ายกระแสคงที่ได้ดี จึงควรจะนำมาใช้กับเลเซอร์ไดโอด

สิ่งที่ควรระมัดระวังอีกอย่างหนึ่งคือ เลเซอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่ไวต่อประจุไฟฟ้าและความร้อน เพราะฉะนั้นจึงควรเก็บรักษาเหมือนเป็น CMOS และระมัดระวังในการสัมผัสเป็นอย่างมาก ในเรื่องความร้อนนั้น ควรจะติดแผ่นระบายความร้อน (heat sink) กับตัวเลเซอร์ไดโอดในขณะที่ใช้งาน

## 2.3 อุปกรณ์รับแสง

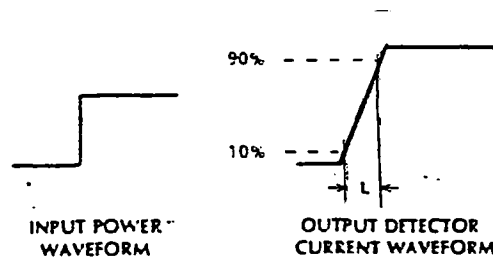
### 2.3.1 โฟโตดีเทคเตอร์ (PHOTODETECTOR)

โดยปกติโฟโตดีเทคเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบตามลักษณะทางกล คือ กลุ่ม External Photoelectric Effect กลุ่มนี้อิเล็กตรอนจะถูก Freed จากพื้นผิวของโลหะโดยอาศัยพลังงานจากโฟตอน ที่ตกกระทบผิวโลหะอุปกรณ์ Vacuum photodiode และ Photomultiplier Tube อาศัยหลักการของปรากฏการณ์นี้ ส่วนอีกกลุ่มจะเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งอิเล็กตรอนและ Hole อิสระจะถูกสร้างขึ้นจากการซึมซับของพลังงาน Photo ซึ่งจะเรียกกลุ่มหลังว่า Internal Photoelectric Effect อุปกรณ์พวก PN Junction Photodiode, Pin Photodiode และ Avalanche Photo diode อาศัยหลักการนี้

คุณสมบัติที่สำคัญของอุปกรณ์รับแสงคือ Responsivity ( $\rho$ ), Spectral response และ Rise time โดยค่า Responsivity จะเป็นสัดส่วนของกระแสทางด้านเอาต์พุทของตัวรับแสงต่อ Optical power ทางด้านอินพุท ตามสมการ (2.5)

$$\rho = i/p \dots\dots\dots(2.5)$$

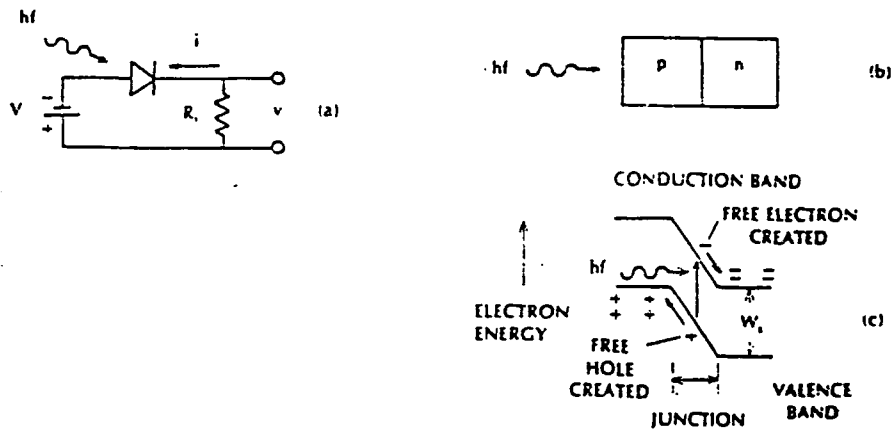
หน่วยของค่า Responsivity คือ แอมแปร์/วัตต์ ในอุปกรณ์รับแสงบางชนิดอาจจะวัดค่าเอาต์พุตออกมาในรูปของโวลเตจ ดังนั้นหน่วยของ Responsivity จะเป็นโวลต์/วัตต์ ค่าของ Spectralresponse หมายถึง curve ของค่า Responsivity ที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามความยาวคลื่นทำให้อุปกรณ์รับแสงที่ต่างกันอาจต้องใช้งานในวินโดว์ (window) ที่ต่างกันของ Optical spectrum ตามการออกแบบของตัวรับ ค่าที่สำคัญอีกอย่างคือ Rise time ( $T_r$ ) จะเป็นค่าของช่วงเวลาที่กระแสทางด้านเอาต์พุตของตัวรับ เปลี่ยนจาก 10 % ไปเป็น 90 % ของค่าสุดท้ายแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะ Rise time

### 2.3.2 อุปกรณ์รับแสงชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Photodiode)

อุปกรณ์ Photodiode ที่สร้างจากเซมิคอนดักเตอร์ ให้กำลังค่อนข้างต่ำและสามารถทำงานที่โวลเตจไปแอสต้า ตัวอย่างของ PN Photodiode อย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.8



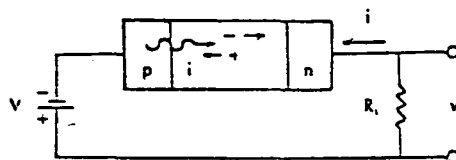
รูปที่ 2.9 (a) เมื่อป้อน reverse bias (b) แสดงลักษณะของ PN Junction (c) แสดงระดับพลังงาน

เมื่อให้ reverse bias จะทำให้ Energy Barrier ระหว่างรอยต่อบริเวณ พี และเอ็น เพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอนอิสระทางด้านเอ็น และ โฮลอิสระทางด้านพี ไม่สามารถข้ามบริเวณ Energy Barrier จึงไม่มีกระแสไหลบริเวณรอยต่อที่ไม่มีประจุอิสระใด ๆ เลยเรียกบริเวณนี้ว่า Depletion Region บริเวณความต้านทานสูงเป็นผลให้โวลเตจทั้งหมดที่ตกคร่อม diode จะตกคร่อมบริเวณนี้เกือบหมด

พิจารณารูป 2.8 (c) เมื่อกลุ่มก้อนโฟตอนถูกซึมซับใน Junction หลังจากที่ผ่านมาขึ้นพี การดูดซับพลังงานโฟตอนทำให้อิเล็กตรอนข้าม bandgap จาก valence band ไปยัง conduction band ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และจะทำให้ Hole ออกจาก valence band ดังนั้นจะมีประจุอิสระที่ถูกสร้างขึ้นจากการดูดกลืนโฟตอน ซึ่งอิเล็กตรอนจะเคลื่อนตัวลงไปยัง barrier และ hole ก็เคลื่อนที่ไปยัง barrier ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสไหลผ่านวงจรภายนอก เหมือนกับการปลดปล่อยแสงของอิเล็กตรอน ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดกระแสไหลในหลอดโฟโตไดโอด เมื่อโฮลและอิเล็กตรอนเกิดรวมตัวกันใหม่ที่บริเวณนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าน้อย ๆ ซึ่งจะทำให้ประจุต่าง ๆ หยุดเคลื่อนที่ ทำให้กระแสหยุดไหล นอกจากนี้ประจุพาหะจะถูกสร้างขึ้นใกล้ ๆ Depletion และมันสามารถที่จะแพร่ผ่านบริเวณนี้ไปได้ ดังนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าจำนวนมากที่บริเวณรอยต่อ ทำให้มีกระแสจากภายนอกเกิดขึ้น

### 2.3.3 พีไอเอ็น โฟโตไดโอด (PIN Photodiode)

พีไอเอ็น โฟโตไดโอด นิยมใช้กันมากในระบบการสื่อสารเส้นใยแสง พีไอเอ็น มีชั้นอินทรินสิค (Intrinsic) ที่อยู่ระหว่าง พี-เอ็น จึงกว้างดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในชั้นอินทรินสิค จะไม่มีประจุอิสระ ดังนั้นจึงมีความต้านทานสูง ทำให้โวลเตจที่ตกคร่อมไดโอดจะตกคร่อมที่ชั้นนี้เกือบหมดและมีแรงดันเนื่องจากสนามไฟฟ้าสูงมาก ด้วยเหตุที่ชั้นอินทรินสิคมีความกว้างมาก ดังนั้นกลุ่มก้อนโฟตอนจึงมีโอกาที่จะถูกดูดซับในชั้นนี้ได้มากกว่าในบริเวณพี และ เอ็น จึงทำให้ประสิทธิภาพ ของ พีไอเอ็นโฟโตไดโอด ค่อนข้าง



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของ พีไอเอ็น โฟโตไดโอด

ในการสร้างคู่อิเล็กตรอน โฮล ต้องอาศัยพลังงานที่เพียงพอจากกลุ่มก้อนโฟตอนที่สร้างอิเล็กตรอนให้ข้าม แถบพลังงานได้ พลังงานของโฟตอน ( $hf$ ) โดย  $hf > E_g$  ทำให้เราสามารถหาค่าของ CUT OF WAVELENGTH ได้ดังสมการ

$$\lambda = 1.24 / E_g$$

โดยค่านี้มีหน่วยเป็น  $\mu m$  และ  $E_g$  คือค่าของ band gap energy ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลท์

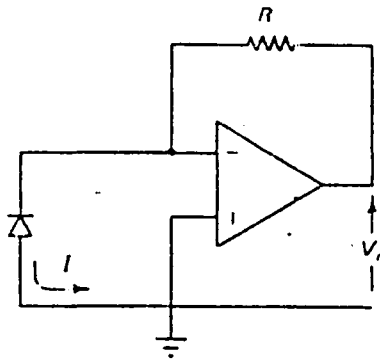
### 2.3.4 ฉะวาลานซ์ โฟโตไดโอด (Avalanche Photodiode)

เป็นรูปแบบหนึ่งของระบบ ภาคขยายที่ใช้ร่วมกับโฟโตไดโอดเพื่อใช้ในการขยายกระแสโฟโตที่สร้างจากคู่ อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งจะให้ความไวแสงและความเร็วสูงอย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรบกวนและการขยายนั้นเป็นไปได้ยากมาก และราคาค่อนข้างสูง และในเรื่องของอุณหภูมิและการควบคุม ตลอดจนค่าโวลเตจไบอัสที่ค่อนข้างสูง (100-300 volt) ก็จำเป็นต้องรู้จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้

### 2.4 Detector Circuits

วงจรของ โฟโตไดโอดสามารถทำได้ 2 โหมด คือ Photovoltaic Mode และ Photoconductive Mode โดย Photovoltaic Mode จะไม่มีการไบอัสให้กับไดโอดแต่ Photoconductive Mode มีการไบอัส

การนำ Photodiode มาใช้ในการประยุกต์กับออปแอมป์ (Operation Amplifier) สามารถทำได้ 2 วิธี โดยมี Photocurrent จะเป็น input current ของ ทั้ง 2 วิธี ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.11 แสดงวงจร Photodiode ใน Photovoltaic Mode

ในทางปฏิบัติมีค่า ๆ หนึ่งที่มีความสำคัญกับ Photodetector คือค่า Responsivity (R) บางครั้งอาจเรียกว่า radiant sensitivity ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของ Photocurrent (กระแสที่เกิดจากการดูดกลืนโฟตอน) กับพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบ

$$R = I_p / P_e \dots\dots\dots (2.6)$$

โดย R มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์ (Ampere/Watt)

และ  $I_p = (N_e * e) / s \dots\dots\dots (2.7)$

โดย e เป็นประจุของอิเล็กตรอน

$N_e$  เป็นจำนวนของอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้น

$$P_e = (N_e E_p / s) \dots\dots\dots (2.8)$$

โดย  $E_p$  เป็นพลังงานของโฟตอน

$N_p$  เป็นจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ

ดังนั้นจะได้  $R = (N_e e) / (N_p E_p) = (n_e e) / E_p \dots\dots\dots (2.8)$

$$R = (n_e e) / (hf) = [n_e (e \lambda)] / (hc) \dots\dots\dots (2.9)$$

$\lambda$  มีหน่วยเป็นเมตร

c มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

R มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์

e มีหน่วยเป็นคูลอมป์

จะได้  $R = (n_e \lambda) / 1.24 \dots\dots\dots (2.10)$

$\lambda$  มีหน่วยเป็นไมโครเมตร

R มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์

จากสมการข้างต้น และ Responsivity จะเพิ่มขึ้นได้ โดยการเพิ่ม เมื่อแสงพุ่งเข้าสู่โฟโตไดโอด ที่บรรจุอยู่ภายในแก้วหรือพลาสติก โดยแสงต้องทะลุผ่านชั้นนี้หรือเอ็นเข้าสู่ คิวลิชั่น (depletion) หรือ อินทรีนลิด โดยการผ่านเข้าได้ก็ขึ้นอยู่กับกำลังส่งของแสงด้วย

ตารางที่ 2.3 ตารางเปรียบเทียบตัวรับแสงชนิดต่าง ๆ

PHOTO DETECTOR	WAVELENGTH ( nm )	RESPONSIVITY ( A/W )	DARK CURRENT ( nA )	RISE TIME ( nS )	OPERATING VOLTAGE ( v )
Si P-N	550- 850	0.4 - 0.7	1 - 5	5 - 10	20 - 40
Si PIN	850- 950	0.6 - 0.8	3 - 300	1 - 5	5 - 40
InGaAs PIN	300-1500	0.8	10 - 30	1 - 3	5 - 40
Si APD	650- 900	7.4-100	1	0.5 - 2	60 - 120
Photo TR <sub>1</sub>	800- 900	70	25 - 100	5 - 15 $\mu$ S	10

**บทที่ 3**  
**เส้นใยนำแสง**

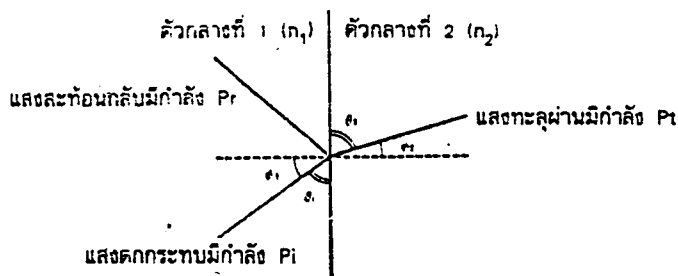
**3.1 หลักการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง**

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงรายละเอียดต่างๆของเส้นใยนำแสง โดยจะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นของแสงก่อน

**3.1.1 ปรัชญาการพื้นฐานของแสง**

**1. การหักเหและการสะท้อนกลับของแสง**

ในการที่แสงทะลุผ่านตัวกลาง 2 ชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกันนั้น ตรงรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง ส่วนหนึ่งของแสงจะสะท้อนกลับ และส่วนที่เหลือจะหักเห ความสัมพันธ์ของดัชนีการหักเห มุมหักเห มุมตกกระทบ แสดงดังรูป 3.1 และสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของสิ่งเหล่านี้เรียกว่า กฎของสเนลล์



**รูป 3.1 แสดงแสงที่ทะลุผ่านและสะท้อนกลับ**

สมการของกฎของสเนลล์แสดงดังสมการ(3.1)

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_2} \dots\dots\dots (3.1)$$

หรือแสดงด้วยมุม  $\phi_1, \phi_2$  จะได้ดังนี้

$$\frac{\cos \phi_2}{\cos \phi_1} = \frac{n_1}{n_2} \dots\dots\dots (3.2)$$

นอกจากนั้น กรณีที่พิจารณากำลังแสงที่เดินทางจะได้ว่า ผลรวมของกำลังแสงที่ทะลุผ่าน (กำลังของแสงหักเห, Pt) กับกำลังแสงสะท้อนกลับ (Pr) จะมีค่าเท่ากับกำลังแสงตกกระทบ (Pi) ดังสมการ

$$Pt + Pr = Pi \dots\dots\dots (3.3)$$

และถ้าให้ T เป็นสัมประสิทธิ์กำลังแสงที่ทะลุผ่าน

R เป็นสัมประสิทธิ์กำลังแสงที่สะท้อนกลับ จะได้สมการที่อยู่ในเทอมของดัชนีการหักเห และมุมตกกระทบ (เท่ากับมุมสะท้อนกลับ) ดังสมการต่อไปนี้

$$T = \frac{Pt}{Pr} = \frac{4n_1 \cos \phi_1 n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \phi_1}{(n_1 \cos \phi_1 + n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \phi_1)^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$R = \frac{Pr}{Pi} = \frac{(n_1 \cos \phi_1 - n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \phi_1)^2}{(n_1 \cos \phi_1 + n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \phi_1)^2} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\text{โดยที่ } T+R = 1 \dots\dots\dots (3.6)$$

ความสัมพันธ์ของ T และ R ต่อมุมตกกระทบ แสดงดังรูป 3.3

ในการที่ T และ R จะเป็นจำนวนจริงได้นั้น เทอมที่อยู่ในเครื่องหมายยกกำลัง 2 ของสมการจะต้องเป็นจำนวนจริง นั่นคือ ตัวเลขในเครื่องหมายยกกำลัง 2 จะต้องเป็นศูนย์หรือเป็นบวก กรณีที่  $n_1 < n_2$  นั้นค่ามุมตกกระทบจาก  $0 < \phi_1 < 90$  ทุกค่าจะทำให้เทอมในเครื่องหมายยกกำลัง 2 เป็นจำนวนจริง และ  $T = 0$  และ  $R = 1$  แสดงว่าไม่เกิดการสะท้อนกลับหมด

สำหรับกรณีที่  $n_1 > n_2$  นั้น จะมีค่ามุมตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots (3.7)$$

เมื่อ  $\phi_1 < \phi_c$  นั้น เทอมที่อยู่ในเครื่องหมายยกกำลัง 2 จะเป็นบวก นั่นคือเป็นจำนวนจริงแต่เมื่อ  $\phi_1 > \phi_c$  เทอมที่อยู่ในเครื่องหมายยกกำลัง 2 จะไม่เป็นจำนวนจริงทำให้สมการ (4) และ (5) ไม่เป็นจริง กรณีนี้ ถ้าหากทำการพิจารณาราสละเอียดยุทธศาสตร์ที่เปลี่ยนแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วจะพบว่า เมื่อ  $\phi_1 > \phi_c$  จะทำให้

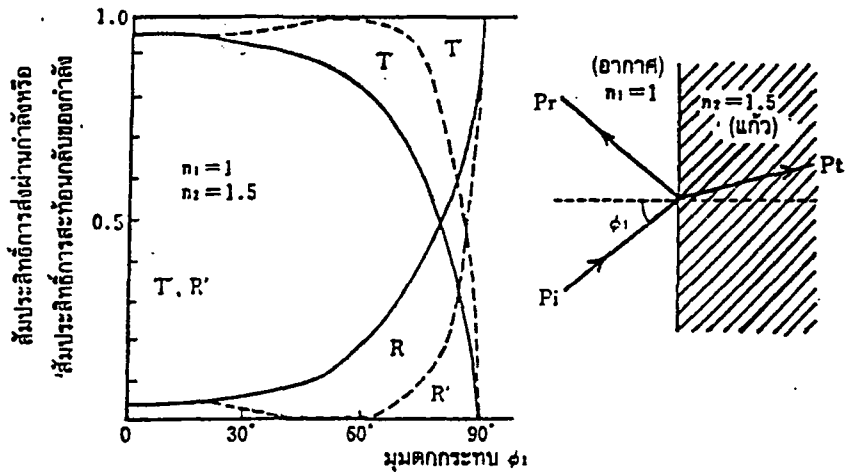
$$T = 0$$

$$\text{และ } R = 1$$

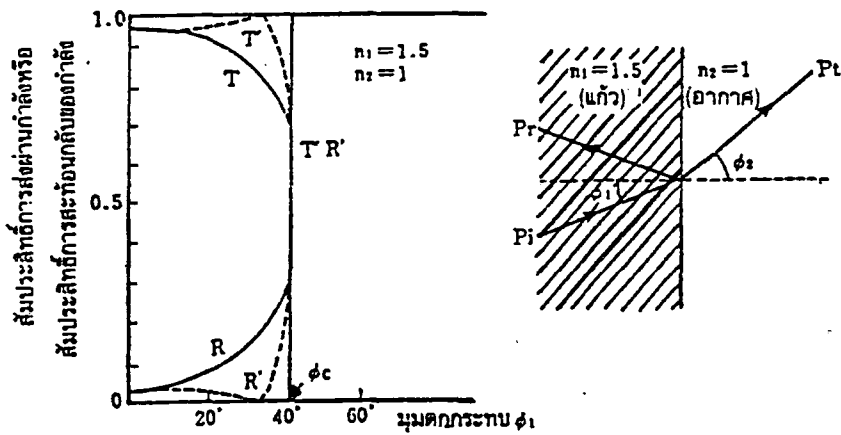
นั่นคือเกิดการสะท้อนกลับหมด

นอกจากนั้น ถ้าหากตรวจดูค่าสัมประสิทธิ์ของขนาดการสะท้อนกลับ  $r$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนของขนาดของแสงที่สะท้อนกลับต่อขนาดของแสงที่ตกกระทบ จะพบว่าค่าสัมบูรณ์ของ  $r$  เป็น 1 และมีการเปลี่ยนแปลงของมุม ซึ่งกำหนดจากมุมตกกระทบ  $\phi_1$  หมายความว่า ตอนเกิดการสะท้อนกลับหมดนั้น ขนาดของแสงสะท้อนกลับจะเท่ากับขนาดของแสงตกกระทบ แต่ที่ว่าเฟสจะเปลี่ยนแปลงไป เท่ากับค่ามุมเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ของขนาดการสะท้อนกลับ การเปลี่ยนแปลงเฟสของแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับตรงบริเวณรอยต่อของตัวกลาง 2 ชนิดนี้เรียกว่า GOOSE-HANSHEN SHIFT ปริมาณการเปลี่ยนแปลงเฟสนี้ เมื่อ  $\phi_1 = \phi_c$  จะมีค่าเท่ากับ 0 แต่เมื่อ  $\phi_1 = 90$  นั้น  $\Phi = \pi$  (เรเดียน) นั่นคือเมื่อมุมตกกระทบมีค่าใกล้เคียงกับค่ามุมวิกฤตนั้น จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสอันเนื่องมาจากการสะท้อนกลับหมด แต่กรณีที่มุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤตแล้วเฟสจะเปลี่ยนไป 180 นั่นคือเกิดการกลับเฟสนั่นเอง

อนึ่ง สำหรับกรณีที่แสงตกกระทบบนทำมุมตั้งฉากกับรอยต่อของตัวกลาง 2 ชนิด (นั่นคือ  $\phi_1 = 0$ ) จากสมการ(3.4)และ(3.5) จะได้



(1) กรณี  $n_1 < n_2$



(2) กรณี  $n_1 > n_2$

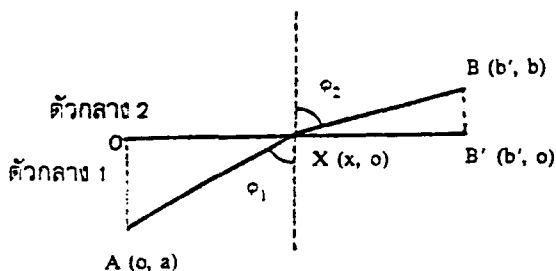
รูป 3.2 แสดงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังและสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของกำลังที่ขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบบน

$$T = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \dots\dots\dots (3.8)$$

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}$$

อนึ่ง สำหรับกฎของสเนลล์นั้น เพื่อเป็นการอ้างอิงจะขอก้าวถึงหลักการของกฎของสเนลล์ดังต่อไปนี้

กฎของสเนลล์นั้นสามารถอธิบายด้วยหลักการของ FERMA ได้ดังนี้คือ หลักการของ FERMA กล่าวว่าระหว่างจุด 2 จุด แสงจะเลือกเส้นทางเดินที่ใช้เวลาน้อยที่สุด สมมติว่ามีตัวกลาง 2 ชนิดคือ ตัวกลาง 1 และตัวกลาง 2 และความเร็วของแสงในตัวกลางทั้งสองเป็น  $N_1$  และ  $N_2$  ตามลำดับ จากรูป



ให้แสงเดินทางระหว่างจุด A และ B

จะได้ว่า

$$t = \frac{a^2 + x^2}{N_1} + \frac{b^2 + (b-x)^2}{N_2}$$

ระยะทางที่ใช้เวลา  $t$  น้อยที่สุดคือ  $dt/dx = 0$

นั่นคือ

$$\frac{1}{N_1} \frac{x}{a^2 + x^2} = \frac{1}{N_2} \frac{b-x}{b^2 + (b-x)^2}$$

จากตรีโกณเรพบว่า

$$\frac{x}{a^2 + x^2} = \sin \phi_1 \quad \text{และ} \quad \frac{b-x}{b^2 + (b-x)^2} = \sin \phi_2$$

ดังนั้น

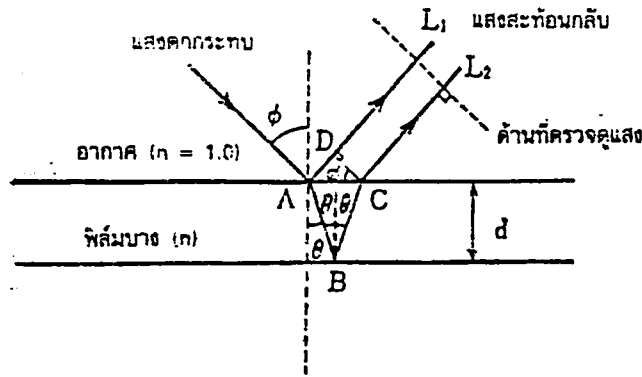
$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

สมการนี้เรียกว่า กฎของสเนลล์

## 2. การรบกวนของแสง(LIGHT INTERFERENCE)

เส้นใยนำแสงเป็นไดอิเล็กตริกที่มีความนำไฟฟ้าเป็นศูนย์ แสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สามารถแสดงได้ด้วยสมการแม็กเวลล์ สมการแม็กเวลล์นี้เป็นสมการในรูปของสมการอนุพันธ์ โดยการใช้เงื่อนไขตรงรอยต่อที่กำหนดจากโครงสร้างของเส้นใยนำแสงมาหาผลลัพธ์ของสมการแม็กเวลล์ จะสามารถแสดงลักษณะการเดินทางของแสงในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ และจะมีเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เป็นไปตามเงื่อนไข PHASE MATCHING ที่กำหนดจากเงื่อนไขตรงรอยต่อเท่านั้นที่เข้าไปใน CORE และเดินทางไปได้ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ เรียกว่า PROPAGATION MODE

อนึ่ง สำหรับคำว่า PHASE MATCHING สามารถอธิบายให้เข้าใจได้ดี ด้วยปรากฏการณ์การรบกวนของแสงที่สะท้อนกลับไปมาตรงรอยต่อของ CORE และ CLAD โดยปรากฏการณ์การรบกวนของแสงคือ ปรากฏการณ์ที่คลื่นจำนวนหนึ่งมีผลกระทำต่อกันและกัน ถ้าตรงจุดที่เฟสเหมือนกันจะเสริมกันให้มีขนาดโตมากขึ้น และถ้าตรงจุดที่เฟสต่างกันจะหักล้างกันทำให้มีขนาดเล็กลง ยกตัวอย่างเช่น ลวดลายสีต่างๆที่เราเห็นจากผิวด้านนอกของฟองสบู่หรือคราบน้ำมันที่รออยู่เหนือผิวน้ำนั้นก็ เป็นตัวอย่างผลของปรากฏการณ์การรบกวนของแสงเหมือนกัน รูป 3.3 แสดงการรบกวนกันระหว่างลำแสง  $L_1$  ที่สะท้อนกลับที่ผิวด้านหน้าของแผ่นฟิล์มกับลำแสง  $L_2$  ที่สะท้อนกลับที่ผิวด้านหลังของแผ่นฟิล์ม



รูป 3.3 แสดงปรากฏการณ์ของ INTERFERENCE ของแสง

โดยทั่วไป เฟสของแสงที่เดินทางในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห  $n$  นั้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าดัชนีการหักเหคูณด้วยระยะทาง และคูณด้วย  $2\pi/\lambda$  โดยมีหน่วยเป็น เรเดียน นอกจากนี้ ลำแสง  $L_1$  ในรูป 3.3 ตรงจุด A ที่สะท้อนกลับจะมีเฟสตามหลัง (lag) อยู่  $\pi$  (180°) ดังนั้น ถ้าให้ความหนาของแผ่นฟิล์มเป็น  $d$  ค่าดัชนีการหักเหเป็น  $n$  ค่าผลต่างทางเฟสของลำแสง 2 อันที่เดินทางมาถึงระนาบที่สังเกตดูลำแสงจะมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$2\pi [n(AB+BC)-AD] - \pi$$

ดังนั้นผลต่างทางเฟสของลำแสง  $L_1$  และ  $L_2$  ของรูป 3.3 เขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} 2\pi [n(AB+BC)-AD] - \pi &= 2\pi \frac{2nd}{\cos \phi} (1 - \sin^2 \theta) - \pi \\ &= 2\pi/\lambda \ 2nd \cos \theta - \pi \end{aligned}$$

กรณีที่ผลต่างทางเฟสของลำแสง 2 อันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ  $\pi$  ด้วยเลขคู่

$$\text{นั่นคือ} \quad 2\pi \ 2nd \cos \theta - \pi = 2m\pi \quad (m \text{ เป็นเลขเต็มหน่วย})$$

หรือ  $2nd \cos \theta = (m+1/2) \dots\dots\dots (3.9)$

การรบกวนของแสงจะเป็นลักษณะเสริมกัน

ในทางตรงกันข้าม กรณีที่ผลต่างทางเฟสของลำแสง 2 อัน มีค่าเป็นจำนวนเท่าของ  $\pi$  ด้วยเลขคี่ นั่นคือ

$2n 2nd \cos \theta - \pi = (2m-1)\pi$  (m เป็นเลขเต็มหน่วย)

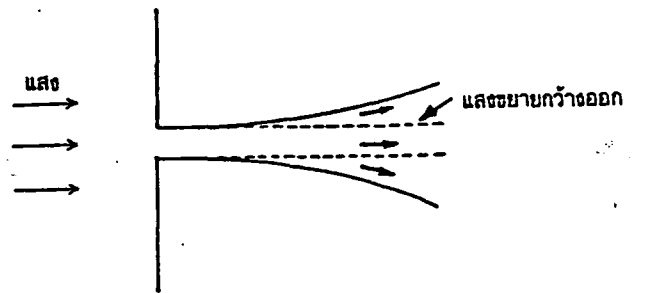
หรือ  $2nd \cos \theta = m \dots\dots\dots (3.10)$

กรณีนี้การรบกวนของแสงจะเป็นลักษณะหักล้างกัน

ลำแสงต่างๆที่สะท้อนกลับไปมา ระหว่างรอยต่อของ CORE กับ CLAD และเดินทางในเส้นใยนำแสงนั้น ลำแสงที่รบกวนกันและเสริมกันนั้นจะกลายเป็น PROPAGATION MODE ส่วนลำแสงที่รบกวนและหักล้างกันนั้นจะไม่เป็น PROPAGATION MODE (ไม่เดินทางไปในเส้นใยนำแสง) ดังนั้น แสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสง สามารถแสดงด้วยกลุ่มของลำแสงที่เป็นไปตามเงื่อนไขของ PHASE MATCHING

3. การเบี่ยงเบนของแสง(DIFFRACTION)

ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสง คือ เมื่อแสงผ่านรูเล็กๆแล้วจะมองเห็นมันขยายกว้างออก ดูรูป 3.4 ประกอบ และในการพิจารณารูปร่าง(PATTERN) ของแสงที่เกิดการเบี่ยงเบนนี้ ส่วนมากจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบ FRAUNHOFER DIFFRACTION PATTERN กับแบบ FRESNEL DIFFRACTION PATTERN สำหรับแบบแรกนั้นสมมติให้แหล่งกำเนิดแสงและจุดที่มองดูแสงอยู่ห่างจุดที่เกิดการเบี่ยงเบนเป็นระยะทางอนันต์และทำการอธิบายปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของคลื่นในระนาบ (PLANE WAVE) ส่วนแบบหลังนั้นสมมติให้แหล่งกำเนิดแสงหรือจุดที่มองดูแสงอย่างใดอย่างหนึ่ง มีระยะทางจำกัดและอธิบายปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของคลื่นทรงกลม (SPHERICAL WAVE)



รูป 3.4 แสดงปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสง

ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของแสงนี้ จะเกิดขึ้นกับแสงที่ปล่อยออกมาจากเส้นใยนำแสงด้วยเช่นกันดังแสดงในรูป 3.5

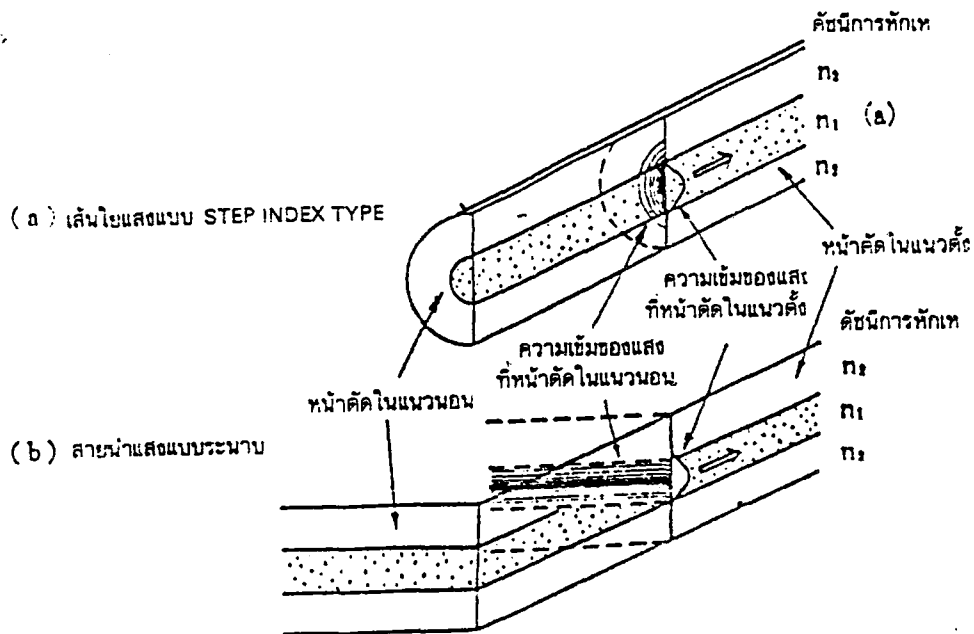
ในกรณีนี้รูปร่างของแสงที่เกิดการเบี่ยงเบนและปล่อยออกไปนั้น ถ้าเป็นรูปร่างของแสงตรงจุดที่อยู่ใกล้ปลายที่ปล่อยแสงออกมา เรียกว่า NEAR FIELD PATTERN หรือย่อว่า NFP และที่จุดที่อยู่ห่างจากปลายที่ปล่อยแสงออกไปมาก ๆ นั้น เรียกว่า FAR FIELD PATTERN หรือย่อว่า FFP ดังนั้น NFP จึงจัดอยู่ในพวก FRESNEL DIFFRACTION PATTERN ส่วน FFP จัดอยู่ในพวก FRAUNHOFER DIFFRACTION PATTERN นอกจากนี้ เนื่องจาก NFP เป็นรูปร่างของแสงที่อยู่ใกล้ปลายของเส้นใยนำแสงมาก จึงแสดงด้วยฟังก์ชันของระยะทาง  $r$  ในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดของเส้นใยนำแสง และ FFP เป็นรูปร่างของแสงที่อยู่ไกลจากปลายของเส้นใยนำแสงมาก จึงแสดงด้วยฟังก์ชันของ  $\theta$  มุมที่ขยายกว้างออกเนื่องจากการเบี่ยงเบนของแสง

1. LIGHT WAVE GUIDE และเส้นใยนำแสง

รูปร่างของ LIGHT WAVE GUIDE มีหลายแบบ ดังเช่น แบบทรงกระบอกเหมือนอย่างเส้นใยนำแสงดังรูป 3.6(a) เรียกว่า CYLINDRICAL รูปร่างของ LIGHT WAVE GUIDE ชนิดที่มีรูปร่างเป็นแผ่นแบบดังรูป 3.6(b) เรียกว่า SLAB รูปร่างของ LIGHT WAVE GUIDE ชนิดที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมดังรูป 3.6(c) เรียกว่า RECTANGULAR รูปร่างของ LIGHT WAVE GUIDE แม้จะมีรูปร่างหลายแบบก็ตาม แต่มีสิ่งที่เหมือนกันคือ ส่วนที่อยู่ตรงกลางมีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าส่วนที่ห่อหุ้มอยู่รอบๆ และแสงจะอยู่ในส่วนตรงกลางและเดินทางไป

2. การเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแบบ STEP INDEX TYPE

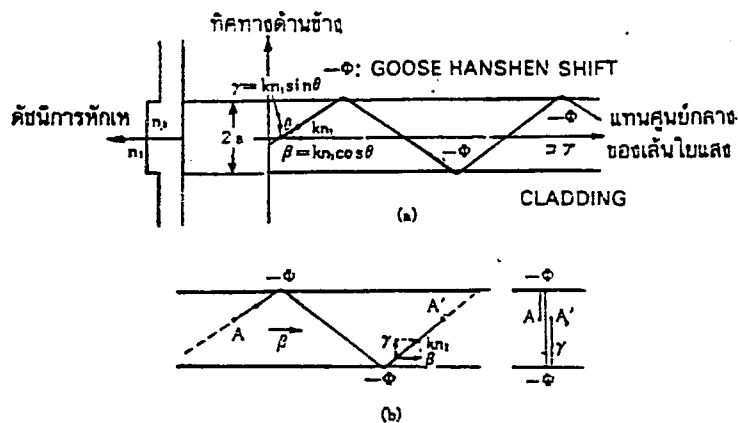
ความคล้ายคลึงกันของเส้นใยนำแสงแบบ STEP INDEX TYPE กับ SLAB TYPE LIGHT WAVE GUIDE จะเห็นได้จากรูป 3.7 นั่นคือถ้าพิจารณาด้านตัดในแนวตั้งจะเห็นว่า มีโครงสร้างเหมือนกันทุกประการ ดังนั้นต่อไปนี้จะทำให้เข้าใจสภาพการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแบบ STEP INDEX TYPE จะอธิบายโดยให้ SLAB TYPE LIGHT WAVE GUIDE แทน เพราะทำให้สามารถเข้าใจได้ง่ายกว่า



รูป 3.7 แสดงความคล้ายคลึงกันของเส้นใยนำแสงกับสายนำแสงแบบระนาบที่ดูจากหน้าตัดในแนวตั้ง

ในการทำความเข้าใจการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง หรือถ้ากล่าวโดยละเอียด ก็คือคุณสมบัติของคลื่นแสงนั้นคือจะต้องคำนึงถึงเฟสของแสง ซึ่งแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงนี้เรียกว่า PROPAGATION MODE และโหมดนี้แสดงด้วยกลุ่มของลำแสงเฉพาะที่เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด จากปริมาณการเปลี่ยนแปลงของเฟส (หรือเงื่อนไข PHASE MATCHING) เมื่อให้ PROPAGATION MODE นี้ แสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงจะไม่แสดงด้วยลำแสงที่เป็นไปตามเงื่อนไขการสะท้อนกลับหมด ( $\theta < \theta_c$  หมายถึงมุมตกค่าที่  $\theta$  น้อยกว่า  $\theta_c$ ) แต่จะแสดงด้วยกลุ่มของลำแสง (PROPAGATION MODE) ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของ PHASE MATCHING

เพื่อเป็นการพิจารณาเกี่ยวกับ PROPAGATION MODE นี้ จะใช้ SLAB TYPE LIGHT WAVE GUIDE ดังแสดงในรูป 3.8 และตรวจดูแสงสะท้อนกลับไปมา (การเลือกใช้ SLAB TYPE LIGHT WAVE GUIDE เพราะว่าเป็นระนาบที่คลื่นมีเฟสเหมือนกันนั่นคือ PLANE WAVE) เมื่อให้ความเร็วของแสงในสุญญากาศ หรือ ในอากาศที่มีค่าดัชนีหักเห  $n = 1.0$  เป็น  $c$  และค่าความเร็วเชิงมุมเป็น  $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ ) และความยาวคลื่นเป็น  $\lambda$  จะได้สมการของ PROPAGATION CONSTANT ของแสงในสุญญากาศ ดังสมการต่อไปนี้



รูป 3.8 แสดงการเดินทางของแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับไปกลับมา

$$k = \omega/c = 2\pi/\lambda \dots\dots\dots (3.11)$$

สมการ(11)เป็นค่าคงที่ที่แสดงปริมาณการเปลี่ยนแปลงทางเฟส เมื่อแสงเดินทางไปได้ระยะทางหนึ่งหน่วยความยาวในสุญญากาศ

อนึ่ง ความเร็ว  $v$  ที่แสงเดินทางใน CORE ที่มีค่าดัชนีหักเห  $n_1$  นั้น จะมีความเร็วเป็นสัดส่วนกลับกับ  $n_1$  ดังสมการ

$$v = c/n_1$$

นั่นคือ จะช้ากว่าความเร็วที่เดินทางในสุญญากาศ

ในกรณีนี้ค่า PROPAGATION CONSTANT ของแสงใน CORE แสดงด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$kn_1 = \omega/v \dots\dots\dots (3.12)$$

จากรูป 3.8 พิจารณาแยกแสงที่ทำมุม  $\theta$  กับรอยต่อของ CORE และ CLAD ออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เดินทางในแนวแกนกับส่วนที่เดินทางในแนวตั้งฉาก ในกรณีนี้จะได้ว่าคลื่นส่วนที่เดินทางในแนวแกนนั้น จะเดินทางด้วย PROPAGATION CONSTANT  $\beta = kn_1 \cos \theta$  และคลื่นส่วนที่เดินทางในแนวตั้งฉาก จะเดินทางด้วย PROPAGATION CONSTANT  $r = kn_1 \sin \theta$  และแสงที่เดินทางยังได้รับ GOOSE-HANSHEN SHIFT:  $-\Phi$  (เฟสจะเข้าไป  $\Phi$ ) ขณะสะท้อนกลับที่ตรงรอยต่อของ CORE กับ CLAD ด้วย

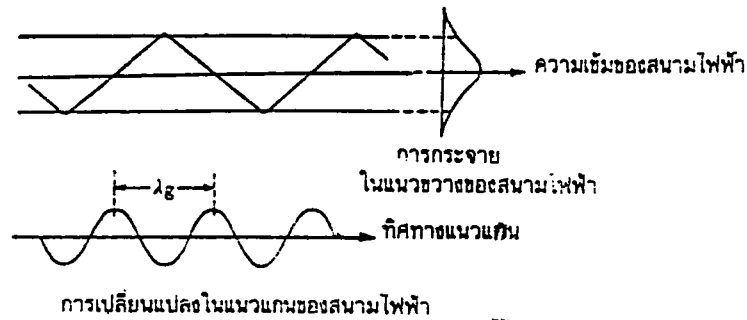
จากรูป 3.8(b) เมื่อพิจารณาคู่คลื่นที่เคลื่อนที่ในแนวตั้งจะเห็นว่า มันจะสะท้อนกลับไปมาหลายครั้ง และเงื่อนไขการเสริมกันของการรบกวน สำหรับคลื่นที่สะท้อนกลับไปมาหลายครั้งนี้ ก็คือปริมาณการเปลี่ยนแปลงเฟส เมื่อคลื่นเดินทางหนึ่งรอบโดยสะท้อน 2 ครั้งที่รอยต่อของ CORE กับ CLAD ด้านบนและด้านล่าง มีค่าเป็นจำนวนเท่าที่เป็นเลขคู่ของ  $\pi$  นั่นคือ  $2N\pi$  (เมื่อ  $N$  คือ  $1, 2, 3, \dots$ ) จากเงื่อนไขนี้เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$2r - 2a - 2 = 2N\pi \quad (N \text{ เป็น เลข เต็ม หน่วย})$$

$$2kn_1 \sin \theta - 2a - 2 = 2N\pi \quad (N \text{ เป็น เลข เต็ม หน่วย}) \dots (3.13)$$

หรือ  $\sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2} \cdot 2a - \Phi = N\pi$

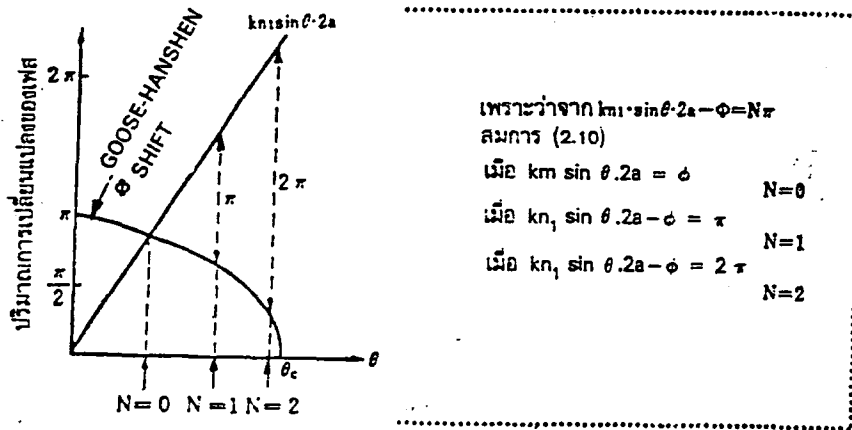
สมการ (3.13) นี้เป็นเงื่อนไขสำหรับแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสง และกลุ่มของแสงที่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้เรียกว่า PROPAGATION MODE ในกรณีนี้ทางแนวตั้งจะมี STANDING WAVE ส่วนทางแนวแกนจะมี TRAVELLING WAVE เดินทางด้วยค่าคงที่ของการแพร่  $\beta$  (ความยาวคลื่นภายในเส้นใยนำแสง)  $\lambda_g = 2\pi/\beta$  การกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้า แสดงดังรูป 3.9



รูป 3.9 แสดงการกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าในสายนำแสง

จากรูปจะเห็นว่า การกระจายของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งนั้นทะลุเลยเข้าไปในส่วนของ CLAD การที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะขณะที่แสงสะท้อนกลับที่รอยต่อของ CORE กับ CLAD เกิดคลื่นที่พื้นผิวทางแนวตั้งในส่วนของ CLAD นั่นเอง ความสัมพันธ์ของขนาดของ GOOSE-HANSHEN SHIFT ตามค่าของมุม  $\theta$  และ  $kn_1 \sin \theta$ .  $2a$  แสดงดังรูป 3.10 เนื่องจากมุมวิกฤต  $\theta_c$  กำหนดค่า  $n$  ค่า  $n_1$  ของ CORE และ ค่า  $n_2$  ของ CLAD ดังนั้นเมื่อกำหนดชนิดเส้นใยนำแสงและความยาวคลื่นแสงแล้ว ค่า  $n_1, n_2$  เส้นผ่าศูนย์กลางของ CORE  $2a$  และค่าคงที่ของการแพร่ของแสงในสุญญากาศ จะกำหนดค่าสูงสุดของ  $N$  ที่ทำให้สมการ(13)เป็นจริง เช่น ในตัวอย่างที่แสดงในรูป 3.10 จะได้ค่า  $N=0, N=1$  จนถึง  $N=2$  และค่าคงที่ของการ

แพร่สำหรับค่า N เหล่านี้เรียกว่า ZERO ORDER PROPAGATION MODE, FIRST ORDER PROPAGATION MODE และ SECOND ORDER PROPAGATION MODE ตามลำดับ การเดินทางของแสงสำหรับ  $N = 0, 1, 2$  และ การกระจายของสนามไฟฟ้าของโหมดของการแพร่เหล่านี้ แสดงดังรูป 3.11

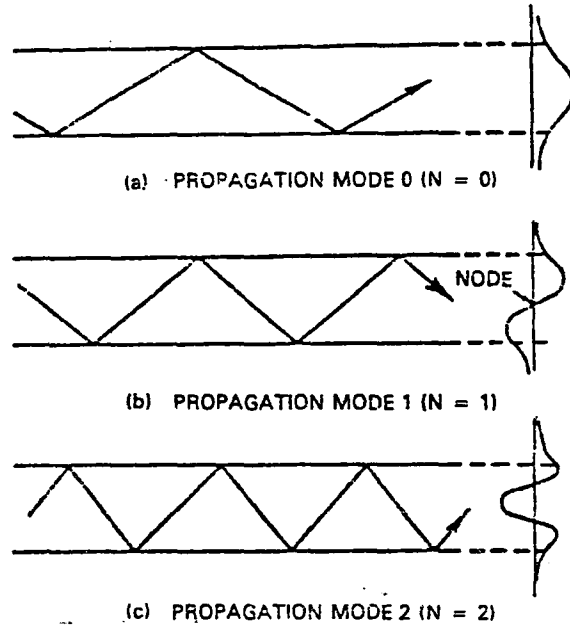


รูป 3.10 แสดงการกำหนด MODE NUMBER

ในกรณีนี้ N จะกำหนดเลขลำดับของการแพร่ และเท่ากับกับจำนวนโหมดของการกระจายของสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง จึงเรียกว่าเลขโหมด (MODE NUMBER) จากรูป 3.11 จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า N มากขึ้น ความชันของลำแสงจะชันมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นความเร็วของโหมดของการแพร่ในแนวแกน (ความเร็วในการเดินทาง) จะช้ากว่าโหมดของการแพร่ที่มีค่ามาก (นั่นคือ N ยิ่งมากยิ่งมีความเร็วมากขึ้น)

อันดับต่อไปจะทำการพิจารณาเกี่ยวกับขนาดของค่าคงที่ของการแพร่ จากรูป 3.8 จะเห็นว่าเมื่อ  $\theta$  มีค่าเท่ากับ  $\theta_c$  และเนื่องจาก  $\cos \theta_c = n_2/n_1$

การกระจายของสนามไฟฟ้าในแนวขวาง



รูป 3.11 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าในแนวขวางของโหมดของการแพร่

ดังนั้น  $\beta = kn_1 \cos \theta_c = kn_2$

และเมื่อ  $\theta > \theta_c$  นั่นคือ  $\beta > kn_2$  แสงจะหักเหที่รอยต่อของ CORE กับ CLAD และทะลุเข้าไปในส่วนของ CLAD ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า RADIATION MODE

ในกรณีตรงกันข้ามเมื่อ  $\theta < \theta_c$  นั่นคือ  $kn_2 < \beta (< kn_1)$  นั้นจะมีโหมดของการแพร่ที่เป็นไปตามสมการ(13)

ค่าคงที่ของการแพร่  $\beta$  ที่รอยต่อของ RADIATION MODE กับ โหมดของการแพร่ ( $\theta = \theta_c$ ) จะมีค่า

$\beta = kn_2$  และรอยต่อนี้ เรียกว่า CUT OFF สิ่งที่เราสังเกตเห็นก็คือ RADIATION MODE จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามค่า  $\theta$  ที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (กรณี  $\theta > \theta_c$ ) แต่สำหรับโหมดของการแพร่นั้น แม้ว่า  $\theta$  จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่องโดยเป็นไปตามเงื่อนไข  $\theta < \theta_c$  ก็ตาม มันจะเกิดเฉพาะเมื่อ  $\theta$  เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ(13)เท่านั้น จะไม่เกิดต่อเนื่องกันเหมือน RADIATION MODE ดังนั้นค่าของ  $\theta$  ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ(13)นั้น ควรจะแสดงด้วยวิธีใดดี จากรูป 3.10 ที่แสดงความสัมพันธ์ของสมการ

(13) จะเห็นว่า เมื่อค่า  $\theta$  มีค่าน้อยกว่า  $\theta_c$  มากขึ้นจะทำให้ GOOS-HANCHEN SHIFT มีค่าเข้าใกล้  $\pi$  ดังนั้นจากสมการ(13) สามารถหาค่าประมาณของ  $\theta$  ได้ดังนี้

$$\theta_N = \sin \theta_N = \frac{\pi}{kn_1(2a)} (N+1) \dots\dots\dots (3.14)$$

ในกรณีนี้  $N$  มีค่าน้อย

ยกตัวอย่างเช่น ความยาวคลื่นแสง  $0.85 \mu\text{m}$ ,  $n_1=1.475$ ,  $2a = 50\mu\text{m}$  สำหรับ ZERO ORDER MODE จะมีค่า  $\theta_0 = 0.0058$  เรเดียน หรือ  $0.33$  องศา

สำหรับโหมดของการแพร่ที่ใกล้ CUT OFF (นั่นคือ  $\theta = \theta_c$  หรือ  $\beta = kn_2$ ) จากรูป 3.10 จะเห็นได้ว่า ค่าของ  $N$  จะมีค่ามาก และ GOOSE-HANSHEN SHIFT = 0 ค่า  $\Delta n$  ของ CORE กับ CLAD มีค่าน้อยลง (เนื่องจากค่าของ  $\theta_c$  มีค่าน้อยลง การพิจารณาโหมดของการแพร่ สำหรับ  $\theta < \theta_c$  นั้น สามารถสมมติได้ว่า ค่าของ  $\theta$  ก็มีค่าน้อยลงด้วย) และเมื่อใช้ค่าประมาณ  $\theta = \sin \theta$  จะได้ว่า

$$\theta_N = \sin \theta_N = \frac{\pi}{kn_1(2a)} N \dots\dots\dots (3.15)$$

ในกรณีนี้ค่า  $N$  มีค่ามาก

จะเห็นว่าสมการนี้ได้จากการประมาณค่าของสมการ (14) เมื่อ  $N$  มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นสำหรับเส้นใยนำแสงที่มีค่าอัตราส่วนผลต่างของดัชนีการหักเหของ CORE กับ CLAD น้อย สามารถพิจารณาคุณสมบัติของโหมดของการแพร่ได้โดยใช้สมการ (3.14)

3. จำนวนของโหมดของการแพร่

โหมดของการแพร่ หมายถึงว่า ในท่ามกลางแสงต่างๆที่สะท้อนกลับไปมาตรงรอยต่อของ CORE กับ CLAD ( $\theta < \theta_c$ ) นั้น มีลำแสงกลุ่มหนึ่งที่สะท้อนกลับด้วยค่า  $\beta$  ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ(3.13) ดังนั้นจากรูป 3.10 จะเห็นได้ว่าจำนวนของโหมดของการแพร่มีค่าจำกัด สมมติว่า  $N_{max}$  เป็นจำนวนอันดับสูงสุดของโหมดของการแพร่ จะทำให้  $\theta_{N_{max}} = \theta_c$  จากรูป 2.10 ประกอบ ดังนั้นจำนวนของโหมดของการแพร่ :  $v$  หาได้จากสมการ(14) และ  $\sin \theta_c = 1 - \sqrt{\cos^2 \theta_c} = 1/n_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

นั่นคือ  $v = N_{max} + 1 = V/(\pi a) \dots\dots\dots (3.16)$

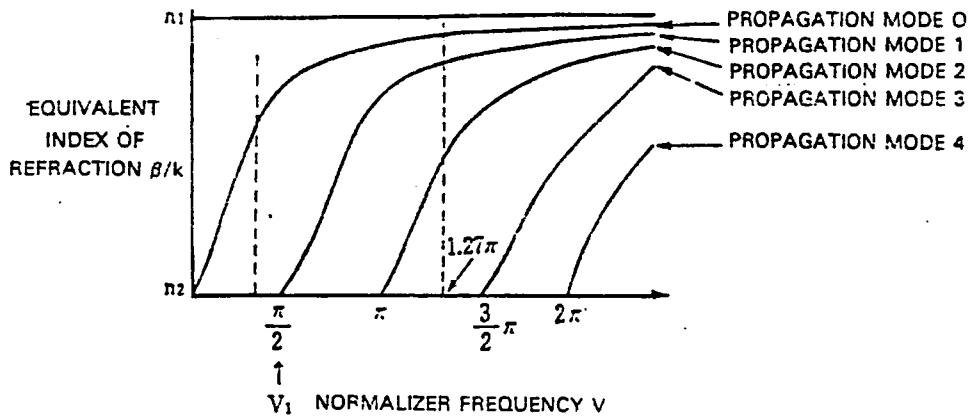
ในที่นี้  $V = ka \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \dots\dots\dots (3.17)$

และอย่าลืมว่าโหมดของการแพร่ นั้น มีจำนวนอันดับตั้งแต่  $N=0$  ไปจนถึง  $N=N_{max}$  สำหรับ  $v$  นี้เนื่องจากเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $k$  ซึ่งเท่ากับ  $\omega/c$  จึงเรียกว่า NORMALIZED FREQUENCY หรือ  $v$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเส้นผ่าศูนย์กลางของ CORE (2a) จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า NORMALIZED WAVE GUIDE WIDTH ยกตัวอย่างเช่น ความยาวคลื่นแสง มีค่า  $0.85 \mu m$ ,  $n_1=1.475$ ,  $n_2=1.46$  [ $\Delta n=(n_1-n_2)/n_1=1\%$ ] ค่า  $v=38.8$  กรณีนี้ จากสมการ(16) เมื่อนำ  $v$  ไปแทนค่าจะพบว่ามีโหมดของการแพร่อยู่ 24 โหมด

ค่าคงที่ของการแพร่  $\beta_N (=kn_1 \cos \theta_N)$  ของโหมดของการแพร่ที่  $N$  นั้น ถ้าหาก กำหนดค่าพารามิเตอร์ของเส้นใยนำแสง (ได้แก่ ค่า  $a, n_1, n_2$ ) และกำหนดค่าความยาวคลื่นของแสง (นั่นคือค่าคงที่ของการแพร่ในสุญญากาศ  $k$ ) จะสามารถหาค่า  $\beta_N$  ได้จาก สมการ(13) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กล่าวข้างต้นสามารถนำมารวมกันและแสดงในรูปของ NORMALIZED FREQUENCY  $v$  ได้กล่าวคือ แทนที่จะเป็น  $\beta$  แต่จะเป็น  $\beta/k$  กับ NORMALIZED FREQUENCY  $v$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในรูป 3.12 ( $\beta/k$  นี้มี โดเมนขึ้นของดัชนีการหักเห และความถี่ของโหมดของการแพร่ที่เดินทางด้วยค่าคงที่ของการแพร่  $\beta$  มีค่าเท่ากับ ค่าความเร็วแสงที่เดินทางเป็นเส้นตรงภายในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห  $\beta/k$  ดังนั้นจึงเรียกว่า EQUIVALENT REFRACTING INDEX )

ยกตัวอย่างเช่น เมื่อความยาวคลื่นแสงเป็น  $0.85 \mu m, 2a=10\mu m, n_1=1.464,$   
 $n_2=1.46, \frac{n_1-n_2}{n_1} = 0.27\%$  จะได้  $v = 1.27 \pi$

จากรูป 3.12 จะเห็นว่าโหมดของการแพร่ที่สามารถเดินทางไปได้คือ โหมด 0, โหมด 1, โหมด 2 รวม 3 โหมดเท่านั้นไม่มีโหมดอื่นที่สูงกว่านี้อยู่เลย (ค่า  $\theta$  ของโหมด การแพร่ตั้งแต่โหมด 3 ขึ้นไปนั้น ค่า  $\theta > \theta_c$  จะหักเหที่รอยต่อของ CORE กับ CLAD และ ทะลุเข้าไปใน CLAD กลายเป็น RADIATION MODE) นอกจากนั้นจะเห็นว่า EQUIVALENT REFRACTING INDEX ของโหมดของการแพร่โหมด 0 มีค่าใกล้เคียงกับ  $n_1$



รูป 3.12 แสดงความสัมพันธ์ของ NORMALIZED FREQUENCY กับ  $\beta/k$

ดังนั้น สำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งนั้นเมื่อนำไปป้อนให้แก่ เส้นใยนำแสงที่มีค่า  $0 < v < v_1 = \pi/2$  แล้ว จะมีโหมดของการแพร่หรือไรบ้างที่สามารถเดินทางไปในเส้นใยนำแสงได้ จะรู้ได้จากรูป 3.12 นั่นคือ มีเพียงโหมดของการแพร่โหมด 0 เท่านั้นที่สามารถเดินทางไปในเส้นใยนำแสงได้ เส้นใยนำแสงแบบนี้เรียกว่า SINGLE MODE (SM) OPTICAL FIBER เพราะฉะนั้นเงื่อนไขสำหรับ SINGLE MODE OPTICAL FIBER ก็คือ

$$0 < v < v_1 = \pi/2 \dots\dots\dots (3.18)$$

เท่าที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการพิจารณาคุณสมบัติต่างๆของเส้นใยนำแสงที่มีรูปร่างเป็นแผ่นแบน หรือ SLAB TYPE ซึ่งแนวความคิดต่างๆเหล่านี้สามารถนำมาใช้ได้กับเส้นใยนำแสงแบบ STEP INDEX TYPE ด้วยเนื่องจากรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดเท่านั้นที่แตกต่างกัน ดังนั้น ค่าตัวเลขต่างๆจึงแตกต่างกับกรณีของเส้นใยนำแสงแบบ SLAB TYPE และ จำเป็นต้องมีการชดเชยค่าบางส่วนเข้าไป ดังนั้นสมการที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นสมการของเส้นใยนำแสงแบบ STEP INDEX TYPE

จำนวนโหมดของการแพร่

$$v_{s1} = [V/(\pi/2)]^2 / 2 \dots\dots\dots (3.19)$$

เงื่อนไขของเส้นใยนำแสง SINGLE MODE จะเป็น

$$0 < v < v_1 = 2.405 \dots\dots\dots (3.20)$$

ในที่นี้  $v$  คือ NORMALIZED FREQUENCY เช่นเดียวกับ  $v_1$

ในกรณีของเส้นใยนำแสงแบบ SLAB TYPE นอกจากนั้นเนื่องจาก  $v$  มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงแม้จะเป็นเส้นใยนำแสงแบบ SINGLE MODE สำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งก็ตามแต่สำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า CUT OFF WAVELENGTH แล้วจะมีโหมดของการแพร่มากกว่า 2 โหมดขึ้นไปเดินทางในเส้นใยนำแสง สำหรับ CUT OFF WAVELENGTH ( $\lambda_c$ ) นี้จาก (14) และ (20) นำมาเขียนได้ดังนี้

$$\lambda_c = \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2.405} \dots\dots\dots (3.21)$$

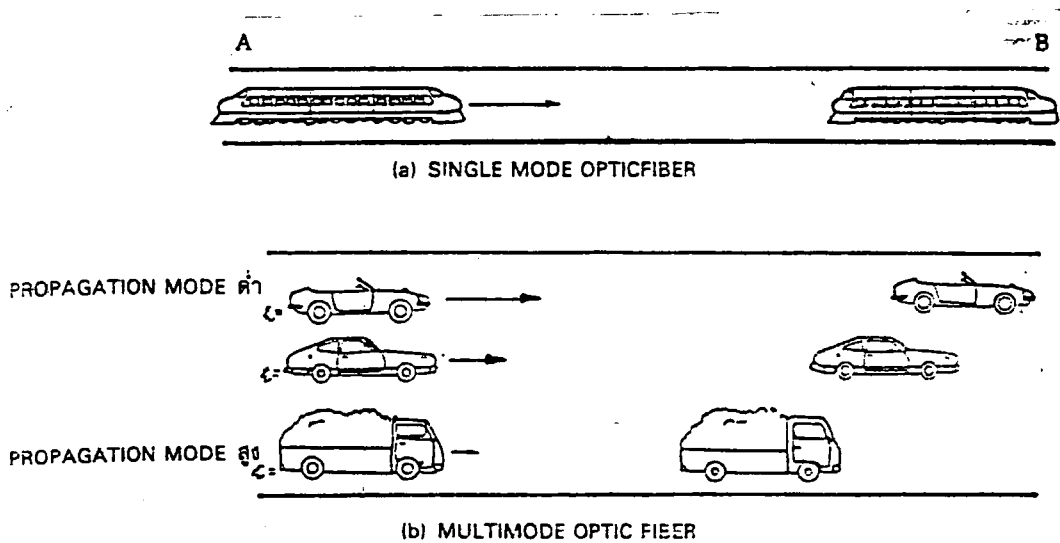
ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเส้นใยนำแสงที่มีค่า  $2a=8 \mu m$ ,  $n_1=1.464$ ,  $n_2=1.46$  สำหรับแสงที่มีความยาวคลื่น  $1.3 \mu m$  จะได้  $v=2.1 < 2.405$  นั่นคือเป็น SINGLE MODE OPTICAL FIBER แต่จากสมการ (3.21)  $\lambda_c = 1.13 \mu m$  ดังนั้นสำหรับแสงที่มีความยาวคลื่น  $0.85 \mu m$  แล้ว เส้นใยนำแสงนี้จะไม่เป็น SINGLE MODE OPTICAL FIBER

ในทางตรงกันข้าม เส้นใยนำแสงที่มีค่า  $v > v_1$  นั้นจะมีโหมดจำนวนมากเดินทางในเส้นใยนำแสงจึงเรียกว่า MULTI MODE OPTICAL FIBER

#### 4. เส้นใยนำแสงแบบ SINGLE MODE กับแบบ MULTI MODE

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหของเส้นใยนำแสงแบบ SINGLE MODE ปกติจะเป็นแบบ STEP INDEX แต่เนื่องจากโหมดของการแพร่มีเพียงโหมดเดียวดังนั้นแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสง จึงมีลักษณะการเดินทางแตกต่างไปจากการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแบบ STEP INDEX ที่เป็น MULTI MODE ซึ่งมีโหมดของการแพร่ 3 โหมด ดังที่กล่าวมาแล้ว นั่นคือในเส้นใยนำแสงแบบ STEP INDEX MULTI MODE นี้ ความเร็วในการเดินทางตามทิศทางการเคลื่อนที่ (แกนยาวของเส้นใยนำแสง) จะมีค่าต่างกันตามโหมดของการแพร่ กล่าวคือ ที่โหมดของการแพร่ที่มีค่าอันดับยิ่งสูงมากเท่าไร ความเร็วในการเดินทางของมันจะยิ่งช้าลงมากเท่านั้น เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นเกี่ยวกับ

การเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแบบ SINGLE MODE และ เส้นใยนำแสงแบบ MULTI MODE จะขอกล่าวอย่างการขนส่งของ ดังแสดงในรูป 3.13 โดยให้เส้นใยนำแสงแบบ SINGLE MODE และ แบบ MULTI MODE ที่จะใช้ส่งข่าวสารจากจุด A ไปยังจุด B แทนด้วยรถไฟด้วกับรถธรรมดา เส้นใยนำแสงแบบ SINGLE MODE เทียบได้กับรถไฟด้วส่วน เส้นใยนำแสงแบบ MULTI MODE เทียบได้กับรถธรรมดาที่รถยนต์หลายชนิดวิ่งอยู่ เช่น รถยนต์นั่งธรรมดา รถสปอร์ต รถบรรทุก สำหรับรถด้วนั้น สิ่งของที่บรรทุกไปจะถึงในเวลา เดียวกัน ส่วนสิ่งของที่บรรทุกด้วยรถยนต์ชนิดต่าง ๆ นั้นจะไปถึงปลายทางด้วเวลาด้วกัน



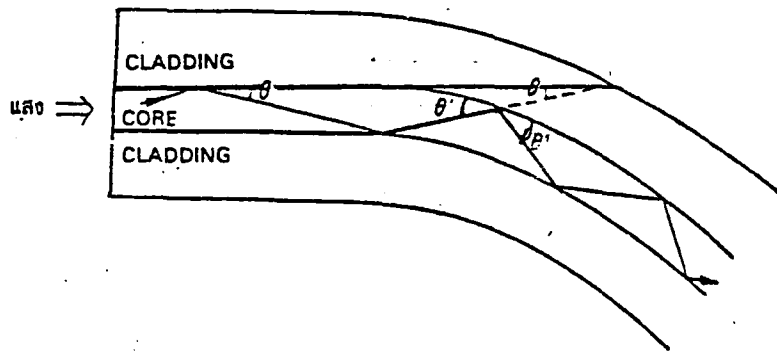
รูป 3.13 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง SINGLE MODE กับ MULTI MODE OPTIC FIBER

### 5. การเปลี่ยนโหมด(MODE CONVERSION)

เมื่อเส้นใยนำแสงงอโค้ง หรือรอยต่อระหว่าง CORE กับ CLAD ไม่เรียบเป็นเส้นตรง แสงที่เดินทางมาด้วโหมดหนึ่ง เมื่อมาถึงส่วนที่งอโค้ง หรือส่วนที่ขรุขระนี้จะเป็นอย่างไร

กรณีที่เส้นใยนำแสงงอโค้ง แสดงด้วรูป 3.14 สมมติว่าแสงที่เดินทางมาด้วโหมดหนึ่ง ในส่วนเส้นใยนำแสงที่เป็นเส้นตรงมีมุมสะท้อนกลับหมดเป็น  $\theta_c$  ตรงส่วนที่เส้นใยนำแสงงอโค้งนั้นมุม  $\theta$  จะไม่เท่ากันกับมุมสะท้อนกลับหมด  $\theta_c$  ดังรูป การที่เป็นเช่นนี้ก็

เพราะเกิดการเปลี่ยนโหมดขึ้น ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าเกิดการเปลี่ยนโหมด (MODE CONVERSION) ในกรณีนี้เมื่อ  $\theta$  มีค่ามากกว่ามุมวิกฤตแล้ว แสงจะเกิดการหักเหขึ้นตรง รอยต่อของ CORE กับ CLAD และทะลุเข้าไปในส่วนของ CLAD กลายเป็น RADIATION MODE เมื่อเกิดการเปลี่ยนโหมดจากโหมดของการแพร่ไปเป็น RADIATION MODE อย่างนี้ จะทำให้เกิด การสูญเสียพลังงานภายในเส้นใยนำแสง เรียกว่า RADIATION LOSS

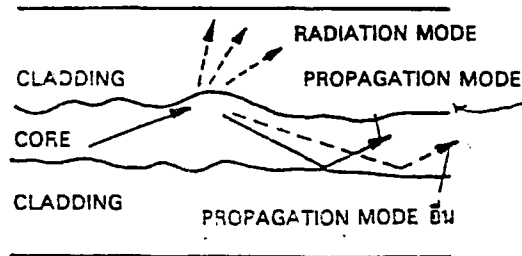


รูป 3.14 แสดงการเปลี่ยนโหมดที่เกิดขึ้นตรงส่วนโค้งของเส้นใยนำแสง

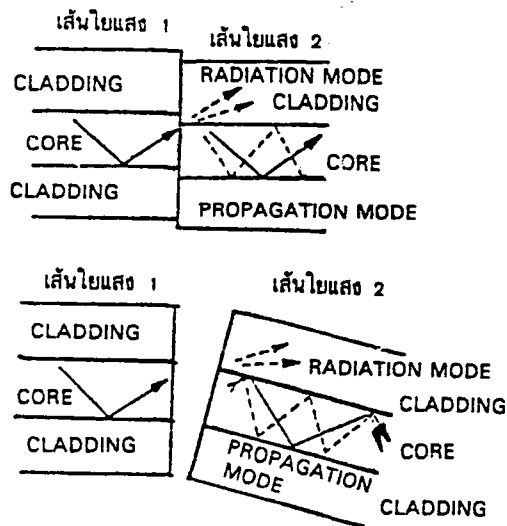
สำหรับเส้นใยนำแสงถ้าหากมีแรงดันมากกระทำทางด้านข้างจะทำให้แกนของมันบิดงอไปหลายไมโครเมตร โดยทั่วไปแล้วมักเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า MICRO BENDING การสูญเสียแสงอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์นี้ มาจากสาเหตุอย่างเดียวกัน กับ RADIATION LOSS ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น และเรียกชื่อว่า MICRO BENDING LOSS

ปรากฏการณ์ที่กรณีที่ยอต่อของ CORE กับ CLAD ไม่เป็นเส้นตรงแสดงดังรูป 3.15 แสงที่เดินทางมาใน CORE เมื่อมาถึงตรงส่วนที่ขรุขระ (ไม่เป็นเส้นตรง) จะถูกบิดงอทำให้เกิดการเปลี่ยนโหมดบ้าง และแสงบางส่วนมีมุมหักเหมากกว่ามุมวิกฤตของการสะท้อนกลับหมดทะลุผ่านเข้าไปใน CLAD ก็มี นอกจากนั้นในการต่อเส้นใยนำแสงสิ่งที่เป็นปัญหา ก็คือ แกนของเส้นใยนำแสงคลาดเคลื่อน แม้ว่าจะทำการต่อเส้นใยนำแสงชนิดเดียวกันก็ตาม ถ้าหากมีแกนของเส้นใยนำแสงคลาดเคลื่อนดังแสดงในรูป 3.16 จะทำให้

มุมตกกระทบที่ เส้นใยนำแสง 2 มีค่าแตกต่างกับมุมตกกระทบที่เส้นใยนำแสง 1 เกิดปรากฏการณ์ที่เหมือนกันกับการเปลี่ยนโหมด



รูป 3.15 แสดงการเปลี่ยนโหมดที่เกิดขึ้นที่รอยต่อขรุขระของ CORE ทั้ง CLADDING



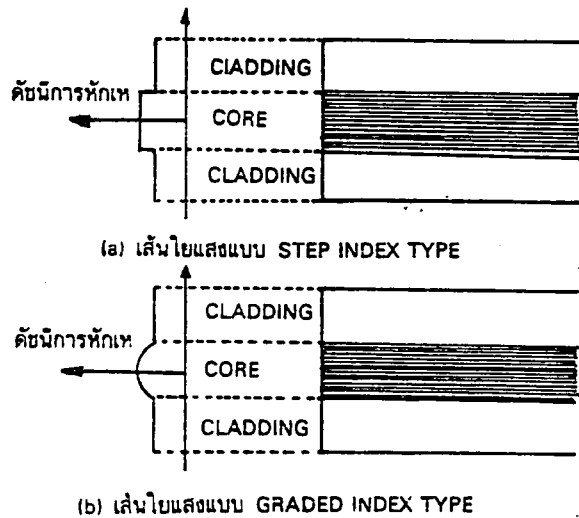
รูป 3.16 แสดงการเปลี่ยนโหมดที่เกิดจากแกนไม่ตรงกัน

นอกจากนี้ ในกรณีที่ผิวหน้าตัดของเส้นใยนำแสงไม่เรียบและขนานกัน จะทำให้มุมหักเหของเส้นใยนำแสง 2 มากกว่ามุมวิกฤตทำให้เกิดแสงรั่วไปใน CLAD (เกิด RADIATION LOSS) บางส่วนด้วยเรียกว่า CONNECTION LOSS

ปรากฏการณ์ต่างๆที่กล่าวข้างต้นเป็นสิ่งที่เกิดขึ้น เมื่อเกิดการคลาดเคลื่อนของแกนไปเพียงแค่ไมโครเมตรเท่านั้น จึงกล่าวได้ว่าการควบคุมไม่ให้เกิดการคลาดเคลื่อนนั้นเป็นการยากมาก

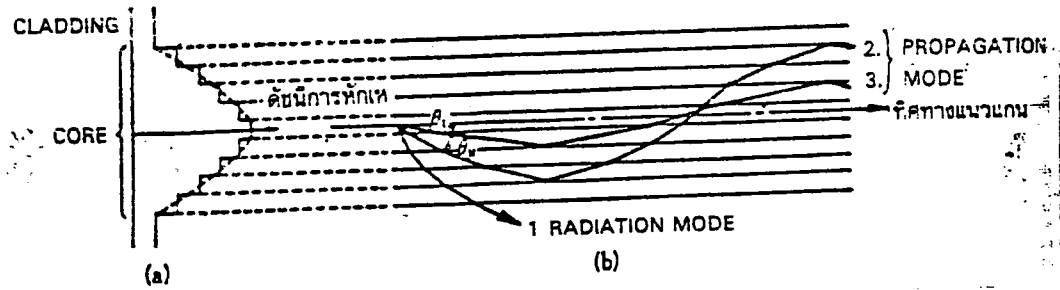
### 6. การเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแบบ GRADED INDEX

ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างเส้นใยนำแสงแบบ STEP INDEX กับ GRADED INDEX ก็คือการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเห ดังแสดงในรูป 3.17 จะเห็นว่าเส้นใยนำแสงแบบ GRADED INDEX นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปที่ละนิด ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันเหมือนกรณีของ STEP INDEX



รูป 3.17 แสดงการกระจายค่าดัชนีหักเหของเส้นใยนำแสง

กล่าวคือค่ากำลัง 2 ของดัชนีการหักเหจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นพาราโบลาตามแนวแกนของเส้นใยนำแสง (เรียกว่า SQUARE DISTRIBUTION) สำหรับเส้นใยนำแสงแบบ GRADED INDEX MULTI MODE ที่มีการกระจายค่าดัชนีการหักเหแบบนั้น มีคุณสมบัติพิเศษคือ ผลต่างของความเร็วการเดินทางของแต่ละโหมดของการแพร่มีค่าน้อยมากสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายค่าดัชนีการหักเห ของของเส้นใยนำแสงแบบ GRADED INDEX แสดงดังรูป 3.18(a) จะเห็นว่าเหมือนกับว่าประกอบด้วยชั้น (LAYER) ที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได (STEP) จำนวนมากมาย ในกรณีนี้ค่าดัชนีการหักเหแต่ละชั้นถือว่ามีค่าคงที่ ส่วนรูป 3.18(b) นั้นแสดงลำแสง 3 อันที่ป้อนเข้าไปตรงชั้นที่อยู่ตรงกลาง ซึ่งมีค่าดัชนีการหักเหสูงมาก จะเกิดการหักเหตามกฎของสเนลล์ ที่รอยต่อของแต่ละชั้น และแสงที่เดินทางไปยังชั้นที่มีค่าดัชนีการหักเหต่ำ ทำให้มุม  $\theta$  ของลำแสงที่กระทำกับแกนของเส้นใยนำแสงมีค่าต่ำลง ลำแสง (1) ที่มีมุมตกกระทบค่าสูงสุด (มุมที่ลำแสงกระทำกับแกนของเส้นใยนำแสง) จะหักเหที่รอยต่อของ CORE กับ CLAD และทะลุเข้าไปใน CLAD ดังรูป กลายเป็น RADIATION MODE ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นกับเส้นใยนำแสงแบบ STEP INDEX เหมือนกัน อันดับต่อไปคือ ลำแสง (2) ซึ่งมีมุมตกกระทบต่ำกว่าลำแสง(1) ในตอนแรกจะเหมือนกันกับลำแสง(1) กล่าวคือจะหักเหไปพร้อมกับเดินทางไปข้างหน้า จนกระทั่งไปถึงชั้นๆหนึ่ง ที่ตรงบริเวณรอยต่อของชั้นลำดับที่ค่าหนึ่งนั้น มุมหักเหของลำแสง (2) มีค่าต่ำกว่าค่ามุมวิกฤต  $\theta_c$  เกิดการสะท้อนกลับหมด นั่นคือลำแสง (2) จะกลับทิศทางมุ่งไปยังส่วนกลางของเส้นใยนำแสง ซึ่งเป็นชั้นที่มีค่าดัชนีหักเหสูง ในกรณีนี้จะทำให้มุมที่ลำแสง(2) ทำกับแกนเส้นใยนำแสงมีค่าเพิ่มขึ้นอีก เมื่อไปถึงชั้นที่มีค่าดัชนีการหักเหสูงที่สุดจะเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นซ้ำอีก ลำแสง (2) จะอยู่ใน CORE และเดินทางไปข้างหน้าสำหรับลำแสง (3) ที่มีมุมตกกระทบน้อยกว่าลำแสง (2) จะเกิดการสะท้อนกลับหมดตรงบริเวณรอยต่อของชั้นที่อยู่ใกล้ศูนย์กลาง ของเส้นใยนำแสงมากกว่าลำแสง (2) พร้อมทั้งเดินทางไปข้างหน้าด้วย กรณีที่ลำแสงเหมือนอย่างลำแสง(2)และ(3) เป็น PROPAGATION MODE ก็เช่นกันจะเหมือนกันกับกรณีของเส้นใยนำแสงแบบ STEP INDEX กล่าวคือถ้าค่าไปถึงเฟสของแสงแล้ว จะปรากฏว่า ค่ามุมตกกระทบของแต่ละโหมดของการแพร่ต่างๆนั้น จะมีค่าจำเพาะที่พอเหมาะเท่านั้น



รูป 3.18 แสดงการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงแบบ GRADED INDEX TYPE

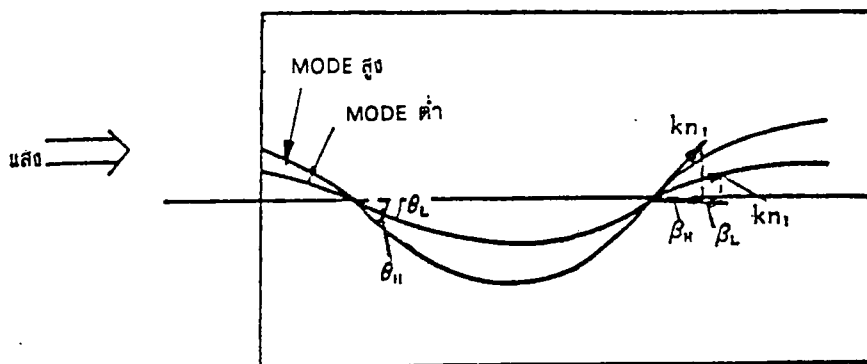
สำหรับเงื่อนไขเฟสที่เหมาะสมของโหมดของการแพร่ในเส้นใยนำแสงมีลติโหมดแบบ GRADED INDEX นั้นสามารถแสดงค่าประมาณได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\int 2[k^2 n^2(r) - \beta^2 - v^2/r^2]^{1/2} dr = 2m\pi$$

ในที่นี้  $v$  และ  $m$  เป็น MODE ORDER ในแนว AZIMUTH และในแนวรัศมีตามลำดับ  
 อนึ่งกรณีที่พิจารณาเส้นใยนำแสง GRADED INDEX ที่มีรูปร่างเป็น SLAB TYPE นั้น  
 ทำได้โดยให้  $v$  ของสมการข้างบนเป็นศูนย์

ต่อไปจะพิจารณาถึง ความเร็วตามแนวแกนของ โหมดของการแพร่ในเส้นใยนำแสง  
 แบบ GRADED INDEX

ลำแสงของโหมดของการแพร่แสดงดังรูป 3.19



รูป 3.19 แสดงลำแสงสำหรับโหมดของการแพร่แต่ละอัน

ค่าคงที่ของการแพร่  $\beta_L$  ในทิศทางแนวแกนของลำแสงที่เดินทางอยู่ใกล้แนวแกนนั้น ที่จุดตัดกับแนวแกน สมมติว่าทำมุม  $\theta_L$  กับแนวแกน โดยการใช้มุม  $\theta_L$  นี้ จะได้

$$\beta_L = kn_1 \cos \theta_L$$

อนึ่ง ค่าคงที่ของการแพร่  $\beta_H$  ของลำแสงที่เดินทางห่างออกจากแนวแกนนั้น แสดงด้วยสมการ

$$\beta_H = kn_1 \cos \theta_H$$

จากรูป 2.19 จะเห็นได้ว่า  $\theta_H > \theta_L$  ดังนั้น

$$\beta_H < \beta_L$$

โดยทั่วไปจำนวนอันดับของโหมดของการแพร่จะมีอันดับต่ำ ถ้าค่าคงที่ของการแพร่  $\beta$  ในทิศทางในแนวแกนมีค่ามาก (นั่นคือเลขโหมดมีค่าน้อย) และถ้า  $\beta$  มีค่าน้อย อันดับโหมดจะสูง (เลขโหมดมีค่ามาก) ดังนั้นลำแสงที่เดินทางใกล้แนวแกนจะมีอันดับโหมดต่ำ ส่วนลำแสงที่เดินทางห่างออกจากแนวแกนจะมีอันดับโหมดสูง

ระยะทางที่ลำแสงอันดับโหมดต่ำเดินทางผ่านนั้นเป็นระยะทางสั้น เมื่อเทียบกับอันดับโหมดสูง แต่ค่าดัชนีการหักเหของเส้นทางที่ผ่านมีค่าสูงจึงทำให้ความเร็วของอันดับโหมดต่ำ ( $v=c/n, c$  เป็นความเร็วแสง,  $n$  เป็นค่าดัชนีการหักเห) มีค่าน้อย ดังนั้นถ้าหากเปลี่ยนค่าดัชนีการหักเหให้เหมาะสมแล้ว ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนของอันดับโหมดต่ำ และอันดับโหมดสูง มีค่าใกล้เคียงกันการกระจายค่าดัชนีการหักเหเมื่อค่าความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนมีค่าเท่ากัน โดยไม่ขึ้นกับอันดับโหมดนี้ เรียกว่า OPTIMUM REFRACTING INDEX DISTRIBUTION (เนื่องจากทำให้ MODE SCATTER หดไป จึงเรียกว่า OPTIMUM)

### 3.1.3 พารามิเตอร์ต่างๆที่แสดงคุณสมบัติของเส้นใยนำแสง

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการบ่งบอก คุณสมบัติต่างๆ ของเส้นใยนำแสง ได้แก่ NORMALIZED FREQUENCY ( $v$ ), CUT OFF WAVE LENGTH ( $\lambda_c$ ) นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ทางแสงที่เกี่ยวข้องกับดัชนีหักเห ซึ่งมีความหมายสำคัญต่อการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง และพารามิเตอร์ทางโครงสร้างที่แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง สำหรับพารามิเตอร์ทางแสงนั้นได้แก่ อัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีหักเหซึ่งแสดงความแตกต่าง

ของค่าดัชนีการหักเหระหว่าง CORE กับ CLAD มุมรับแสง APERTURE NUMBER ซึ่งใช้ในการพิจารณา สภาพการป้อนแสงเข้าเส้นใยนำแสง และ สภาพของแสงที่ออกจากเส้นใยนำแสง, สัมประสิทธิ์การกระจายค่าดัชนีการหักเห ที่ใช้แสดงรูปร่างลักษณะการกระจายค่าดัชนีการหักเหภายใน CORE และอื่นๆ ส่วนพารามิเตอร์ทางโครงสร้างนั้นได้แก่ CORE DIAMETER ซึ่งแสดงเส้นผ่าศูนย์กลางของ CORE, OUTER DIAMETER ซึ่งแสดงเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยนำแสง (หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า CLAD DIAMETER) นอกจากนี้ยังมีอัตราการคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลาง ซึ่งใช้แสดงการคลาดเคลื่อนทางโครงสร้างของวงกลม ที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน และอัตราความเพี้ยนของวงกลม เป็นต้น

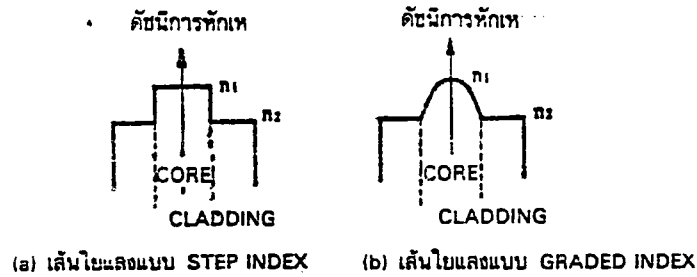
1. พารามิเตอร์ทางแสง

1.1 อัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีการหักเห

อัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีการหักเห เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงความแตกต่างของค่าดัชนีการหักเหของ CORE กับ CLAD ปกติจะใช้สัญลักษณ์ DELTA ( $\Delta$ ) สำหรับเส้นใยนำแสงที่ลักษณะของดัชนีการหักเหดังรูป 3.20 สามารถให้ค่าจำกัดความของ อัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีการหักเหได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{อัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีการหักเห } \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \dots\dots\dots (3.22)$$

เนื่องจาก  $\Delta$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ 1 ดังนั้น โดยปกติทั่วไปจะแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีการหักเห นี้ จุดประสงค์เพื่อแสดงความสะดวกในการป้อนแสงเข้าไปใน CORE โดยทั่วไปแล้ว ถ้าหาก  $\Delta$  มีค่ามากหมายถึงสามารถป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ง่าย



$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

รูป 3.20 แสดงความแตกต่างของค่าดัชนีการหักเห

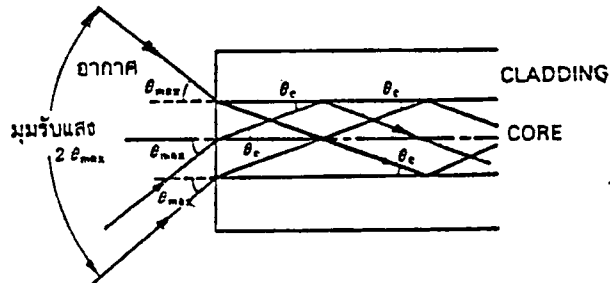
1.2 มุมรับแสง

ในการที่จะให้แสงเดินทางไปในเส้นใยนำแสงนั้น จะต้องให้มุมตกกระทบที่ด้านปลายของเส้นใยนำแสงมีค่าน้อยกว่ามุมที่แสดงในรูป 3.21

ค่า  $\theta_{max}$  นี้ สามารถหาได้จากเงื่อนไขการสะท้อนกลับหมดที่รอยต่อของ CORE กับ CLAD ถ้ากำหนดให้ค่าดัชนีการหักเหของอากาศเป็น  $n_0$  ความสัมพันธ์ของมุมตกกระทบ  $\theta_{max}$  ที่ด้านปลายของเส้นใยนำแสง (รอยต่อระหว่างอากาศกับ CORE) กับมุมหักเห  $\theta_c$  สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้โดยอาศัยกฎของสเนลล์ และจากรูป 3.21 จะได้ว่า

$$\frac{\sin \theta_{max}}{\sin \theta_c} = \frac{n_1}{n_0} \dots \dots \dots (3.23)$$

ในที่นี้ค่าดัชนีการหักเหมีค่าเป็น 1



รูป 3.21 แสดงมุมรับแสง

อนึ่ง มุมวิกฤต  $\theta_c$  หาได้โดยอาศัยกฎของสเนลล์เช่นกัน จะได้ว่า

$$\cos \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots (3.24)$$

หรือ

$$\begin{aligned} \sin \theta_c &= \sqrt{1 - \cos^2 \theta_c} \\ &= \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} \\ &= \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1}} \\ &= \sqrt{2A} \dots\dots\dots (3.25) \end{aligned}$$

ในที่นี้ ค่าดัชนีการหักเหของ CORE และ CLAD ปกติจะมีค่าน้อยกว่า 1.5 ทำให้ผลต่างของค่าดัชนีการหักเหมีค่าประมาณ 0.01 จึงใช้ค่าประมาณของ  $\left(\frac{n_1 + n_2}{n_1}\right) = 2$  ได้

ดังนั้นจากสมการ(23) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \sin \theta_{max} &= n_1 \sin \theta_c \\ &= n_1 \sqrt{2A} \dots\dots\dots (3.26) \end{aligned}$$

การที่จะให้แสงเดินทางไปในเส้นใยนำแสงได้นั้นมุมตกกระทบของแสงจะต้องมีค่าอยู่ในช่วงของ  $2\theta_{max}$  ดังแสดงในรูป 3.21 มุม  $2\theta_{max}$  นี้เป็นมุมรับแสง กรณีที่  $\theta_{max}$  มีค่าน้อย สามารถใช้ค่าประมาณ  $\theta_{max} = \sin \theta_{max}$  (หน่วยของ  $\theta_{max}$  คือ เรเดียน) โดยการใช้สมการ(3.25) จะได้มุมรับแสงดังสมการต่อไปนี้

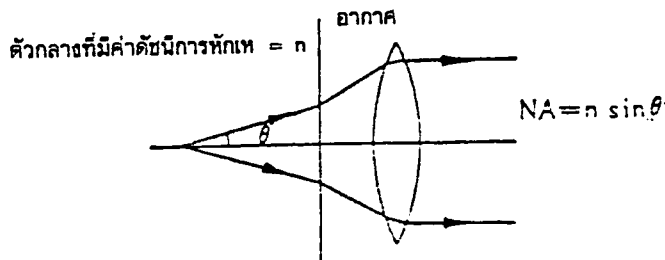
$$\begin{aligned} \text{มุมรับแสง} \quad 2\theta_{max} &= 2\sin \theta_{max} \\ &= 2n_1 \sqrt{2A} \text{ (radian)} \dots\dots\dots (3.27) \end{aligned}$$

นอกจากนั้น มุมออกของแสงเมื่อแสงออกจากเส้นใยนำแสง จะมีช่วงเท่ากันกับช่วงของมุมรับแสง

1.3 NUMERICAL APERTURE (NA)

ในการแสดงประสิทธิภาพของเลนส์วัตถุของกล้องจุลทรรศน์นั้น จะใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า NUMERICAL APERTURE (NA) เป็นตัวแสดง จากรูป 3.22 แสงที่ออกจากวัตถุบนแกนนั้น ให้ลำแสงส่วนที่กว้างออกกว้างที่สุดทำมุม  $\theta$  กับแกน และให้ค่าดัชนีการหักเหของวัตถุเป็น  $n$  จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$NA = n \sin \theta \dots\dots\dots (3.28)$$



รูป 3.22 แสดงค่าจำกัดความของ NA

ในที่นี้  $\theta$  เป็นมุมที่กำหนดจากมุมวิกฤตของรอยต่อของวัตถุกับอากาศ NA นี้มักนิยมใช้ในการพิจารณามุมตกกระทบของเส้นใยนำแสง กล่าวคือในการที่จะทำให้สามารถป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่สุ่นั้น จะใช้เลนส์ที่มี NA ดังสมการ

$$NA = n_1 \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \dots\dots\dots (3.29)$$

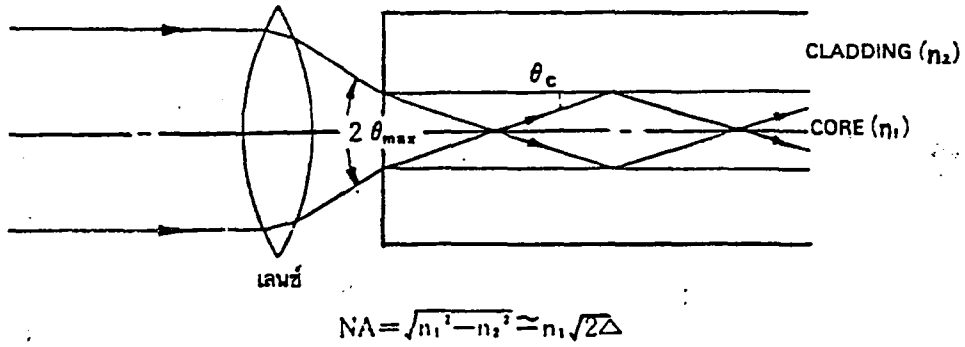
โดยที่  $n_1$  เป็นค่าดัชนีการหักเหของ CORE

$n_2$  เป็นค่าดัชนีการหักเหของ CLAD

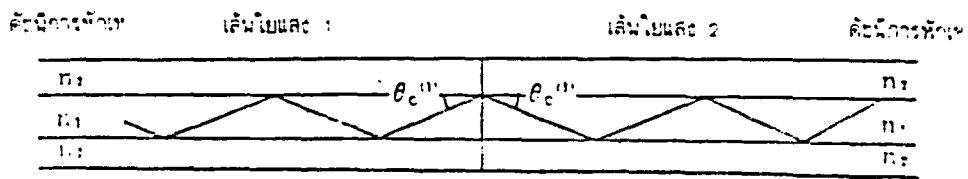
$\Delta$  เป็นอัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีการหักเห

$\theta_c$  เป็นมุมวิกฤตของการสะท้อนกลับหมดที่รอยต่อของ CORE กับ CLAD

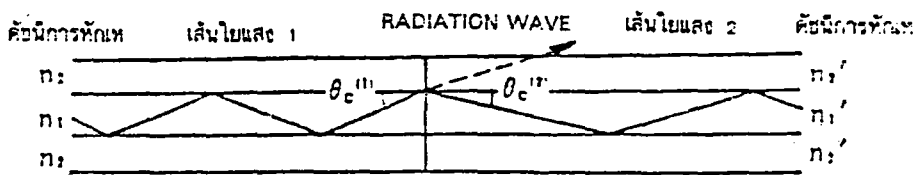
และจัดการรวมแสงดังรูป 3.23



รูป 3.23 แสดงวิธีการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงอย่างมีประสิทธิภาพ



(a) การต่อเส้นใยแสงที่มี NA เท่ากัน



(b) การต่อเส้นใยแสง

รูป 3.24 แสดงการต่อเส้นใยนำแสงและ NA

จากสมการ(29)  $\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  เรียกว่า "NA ของเส้นใยนำแสง" และนิยมใช้ในการตรวจดูเงื่อนไขการป้อนแสง เข้าไปในเส้นใยนำแสงเกี่ยวกับ NA นี้ถ้านำสมการ (3.27) กับ (3.29) มาเปรียบเทียบกับกันจะทำให้เข้าใจความหมายของ NA ได้ดียิ่งขึ้น

โดยเฉพาะอย่างยิ่งการต่อเชื่อมเส้นใยนำแสง ถ้าหากทำการต่อเชื่อมเส้นใยนำแสง 2 เส้นที่มีค่า NA ต่างกันดังแสดงในรูป 3.24(b) จะเห็นว่าแสงที่เดินทางมาจะหลุดออกจาก CORE ตรงรอยต่อเชื่อมทำให้การสูญเสียเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงนิยมใช้ NA มาประเมินผลการสูญเสียของแสงตรงส่วนต่อเชื่อม (CONNECTION LOSS)

#### 1.4 สัมประสิทธิ์การกระจายค่าดัชนีการหักเห

ลักษณะการกระจายค่าดัชนีการหักเหของเส้นใยนำแสงถ้าให้ค่าดัชนีการหักเหจากจุดศูนย์กลางของเส้นใยนำแสงไปจนถึงจุด  $r$  เป็น  $n(r)$  จะสามารถแสดงด้วยสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} n(r) &= n_1 [1 - 2\Delta(r/a)^\alpha]^{1/2}, \quad 0 < r < a \text{ (CORE)} \\ n(r) &= n_2 = n_1 (1 - 2\Delta)^{1/2} \dots\dots\dots (3.30) \\ &= n_1 (1 - \Delta), \quad a < r \text{ (CLAD)} \end{aligned}$$

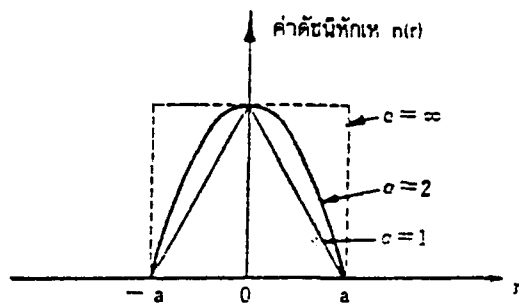
ในที่นี้  $2a$  เป็น CORE DIAMETER

$\Delta$  เป็น อัตราส่วนผลต่างค่าดัชนีการหักเห

และ  $\alpha$  ในสมการ(30) เรียกว่า สัมประสิทธิ์การกระจาย

ค่าดัชนีการหักเห เมื่อ  $\alpha = 1, 2, \infty$  ลักษณะการกระจายค่าดัชนีการหักเหจะเป็นดัง

รูป 3.25

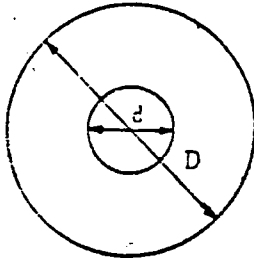


รูป 3.25 แสดงรูปร่างการกระจายของค่าดัชนีการหักเห

จากรูป 3.25 จะเห็นได้ว่าเมื่อ  $\alpha = \infty$  การกระจายค่าดัชนีการหักเหของเส้นใยนำแสง จะเป็นแบบ STEP INDEX สำหรับเส้นใยนำแสงแบบ GRADED INDEX นั้น เพื่อทำให้ผลต่างของเวลาในการเดินทางของโหมดของการแพร่มีค่าน้อย จะควบคุมค่าดัชนีการหักเหเพื่อให้  $\alpha$  มีค่าใกล้ 2

## 2. พารามิเตอร์ทางโครงสร้าง

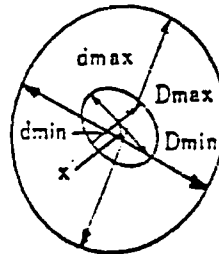
โครงสร้างหน้าตัดกรณีที่ดีที่สุดของเส้นใยนำแสง แสดงดังรูป 3.26(a) กล่าวคือ เส้นรอบวงของ CORE และ CLAD จะมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน



(a) เส้นใยแสงทาบดัชนี

CORE DIAMETER :  $d$

CLADDING DIAMETER :  $D$



(b) เส้นใยแสงทาบปฏิบัติ

CORE DIAMETER :  $d = \frac{d_{max} + d_{min}}{2}$

CLADDING DIAMETER :  $D = \frac{D_{max} + D_{min}}{2}$

อัตราการใช้เป็นวงกลมของ CORE :  $e = \frac{d_{max} - d_{min}}{d} \times 100 (\%)$

อัตราการใช้เป็นวงกลมของ CLADDING :  $E = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \times 100 (\%)$

อัตราการใช้คลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลาง :  $C = \frac{x}{d} \times 100 (\%)$

รูป 3.26 แสดงโครงสร้างหน้าตัดและพารามิเตอร์

โครงสร้างของเส้นใยนำแสง

ในกรณีนี้เส้นผ่าศูนย์กลางของ CORE และเส้นผ่าศูนย์กลางของ CLAD จะกำหนดโครงสร้างหน้าตัดของเส้นใยนำแสง แต่ทว่าในการผลิตเส้นใยนำแสง จะเกิดการผิดรูปร่างไปบ้างเล็กน้อย ดังรูป 3.26(b) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำหนด ค่าจำกัด

ความพารามิเตอร์อื่นๆเพิ่มเติมขึ้นมาอีก นอกเหนือไปจาก CORE DIAMETER และ CLAD DIAMETER และพารามิเตอร์ที่แสดงโครงสร้างเส้นใยนำแสงเหล่านี้ เป็นสิ่งสำคัญต่อกรณี ที่ทำการคาดคะเนการสูญเสียการต่อเชื่อมเส้นใยนำแสง และการประเมินค่าของเส้นใย นำแสง

### 2.1 เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ CORE

เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ CORE เป็นตัวแสดงขนาดความโตของ CORE ซึ่งเป็นส่วนที่ แสงส่วนใหญ่เดินทางผ่านเมื่อป้อนแสงให้แก่เส้นใยนำแสง ในกรณีที่ทำการพิจารณา สภาพการเดินทางของแสงนั้น CORE DIAMETER ถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญคู่กันกับค่าดัชนี การหักเห สำหรับเส้นใยนำแสงที่ดีเยี่ยมนั้น CORE จะเป็นรูปทรงกระบอก ดังนั้น CORE DIAMETER จะแสดงด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมของหน้าตัดของเส้นใยนำแสง ค่า จำกัดความเกี่ยวกับ เส้นใยนำแสงที่สร้างขึ้นจริงนั้นกระทำได้ยาก แม้แต่ความเคลื่อนไหว ของการกำหนดมาตรฐานนานาชาติก็ตาม ยังคงมีปัญหาเกิดขึ้นมากมาย ดังนั้น ในรูป 3.26(b) CORE DIAMETER จะแสดงด้วยค่าเฉลี่ยของผลรวมของเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d_{core}$  และเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d_{min}$

### 2.2 เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ CLAD (CLAD DIAMETER)

เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ CLAD แสดงขนาดความโตของเส้นใยนำแสง ในกรณี ที่ ต้องการพิจารณา RADIATION LOSS ของแสงที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากเส้นใยนำแสง บิดงอ นั้น CLAD DIAMETER นี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญร่วมกับ CORE DIAMETER และ ค่าดัชนีการหักเห นอกจากนั้นยังเป็นพารามิเตอร์สำคัญ ในกรณีประเมินค่าคุณสมบัติการ ต่อเชื่อม และความแข็งแรงทางเมคานิกส์ของเส้นใยนำแสงด้วย

### 2.3 อัตราการไม่เป็นวงกลมของ CORE และอัตราการไม่เป็นวงกลมของ CLAD

พารามิเตอร์ที่แสดง ความคลาดเคลื่อนไปจากการเป็นวงกลมที่สมบูรณ์ของเส้นรอบ วงของ CORE และ CLAD ของเส้นใยนำแสงคือ อัตราการไม่เป็นวงกลมของ CORE และ อัตราการไม่เป็นวงกลมของ CLAD ซึ่งอัตราการไม่เป็นวงทั้งสอง กำหนดจากผลต่างของ เส้นผ่าศูนย์กลางค่าสูงสุดกับเส้นผ่าศูนย์กลางค่าต่ำสุด แล้วหารด้วยค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง มาตรฐาน ใช้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการประเมินค่าการสูญเสียของการต่อเชื่อม

2.4 อัตราความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลาง

เนื่องจากในการผลิตเส้นใยนำแสงนั้นจุดศูนย์กลางของเส้นรอบวงของ CORE กับจุดศูนย์กลางของเส้นรอบวงของ CLAD ของเส้นใยนำแสงไม่อยู่จุดเดียวกันกล่าวคือเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นนั่นเอง อัตราความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางนี้ กำหนดจากอัตราส่วนของระยะระหว่างจุดศูนย์กลาง กับเส้นผ่าศูนย์กลางมาตรฐานของ CORE ใช้เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการประเมินค่าการสูญเสียของการต่อเชื่อม

3. ตัวอย่างที่เป็นตัวเลขของพารามิเตอร์ต่างๆ

3.1 ตัวกลางที่ 1 เป็นน้ำ มีค่าดัชนีการหักเห  $n_1=1.3$

ตัวกลางที่ 2 เป็นอากาศ มีค่าดัชนีการหักเห  $n_2=1.0$

การสะท้อนกลับหมดของแสงจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อแสงเดินทางจากน้ำ ซึ่งมีค่าดัชนีการหักเหสูงไปยังอากาศ ซึ่งมีค่าดัชนีการหักเหต่ำ ในกรณีนี้ มุมวิกฤต  $\theta_c = 50.3$  องศา (หรือ 0.88 เรเดียน)

นอกจากนั้น ขนาดของแสงสะท้อนกลับ และแสงที่ทะลุผ่าน ในกรณีที่แสงจากน้ำไปยังอากาศเดินทางในลักษณะตั้งฉากกับผิวน้ำนั้น จะแสดงค่าด้วยสัมประสิทธิ์กำลังการส่งผ่าน T และสัมประสิทธิ์กำลังการสะท้อนกลับ R

ซึ่ง  $T = 0.983$

และ  $R = 0.017$

นั่นคือ 1.7% ของแสงตกกระทบจะถูกสะท้อนกลับ

3.2 ตัวกลางที่ 1 เป็นอากาศ มีค่าดัชนีการหักเห  $n_1=1.0$

ตัวกลางที่ 2 เป็นเส้นใยนำแสง มีค่าดัชนีการหักเหของ CORE  $n_2=1.475$

ค่าอัตราผลต่างของค่าดัชนีการหักเห  $\Delta=1\%$

ในกรณีนี้ เมื่อแสงจากอากาศไปตกกระทบที่ด้านปลายของเส้นใยนำแสง ในลักษณะตั้งฉากกับด้านปลายของเส้นใยนำแสง จะได้

$T = 0.963, R = 0.037$

นั่นคือประมาณ 4% ของแสงจะสะท้อนกลับที่ผิวนอกของเส้นใยนำแสง ส่วนที่เหลือ 96% จะเข้าไปในเส้นใยนำแสง การสูญเสียอันเนื่องมาจากการสะท้อนกลับนี้ เรียกว่า

COUPLING LOSS ปกติแสดงค่าเป็น dB ดังนั้นในกรณีนี้ COUPLING LOSS มีค่า 0.2 dB

อันดับต่อไป มุมรับแสง  $2\theta_{max}$  โดยการใช้สมการ(27) จะได้  $2\theta_{max} = 0.42 \text{ Rad}$   
= 23.9 องศา ในกรณีนี้หาค่า  $NA = 0.21$

3.3 ตัวกลางที่ 1 เป็น CORE ของเส้นใยนำแสง มีค่าดัชนีการหักเห  $n_1 = 1.475$

ตัวกลางที่ 2 เป็น CLAD ของเส้นใยนำแสง มีค่าดัชนีการหักเห  $n_2 = 1.46$

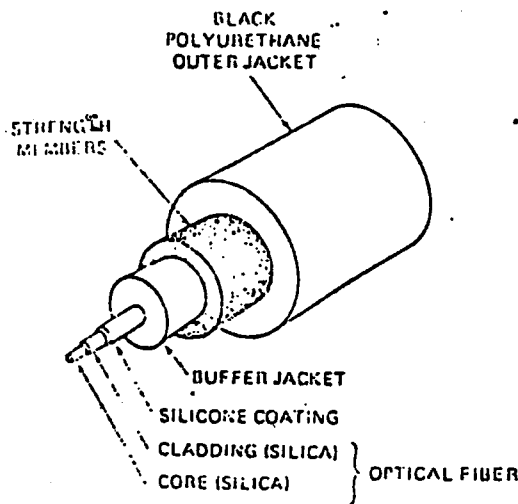
และอัตราผลต่างของค่าดัชนีการหักเห  $\Delta = 1\%$

เมื่อแสงจาก CORE ไปตกกระทบที่ CLAD มุมวิกฤตของการสะท้อนกลับหมด จะขึ้นอยู่กับอัตราผลต่างของค่าดัชนีการหักเหเท่านั้น คูสมการ(25)ประกอบ เมื่อคำนวณหาค่า  $T$  จะได้  $T = 0$  และค่า  $R = 1$  แสดงว่า แสงที่ตกกระทบนั้นเกิดการสะท้อนกลับหมด และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเฟสเลย

### 3.2 ชนิดของเส้นใยนำแสง

#### 3.2.1 โครงสร้างของเส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงประกอบด้วยแกนกลาง (CORE) แล้วล้อมรอบด้วยชั้นของวัสดุที่เรียกว่า แคลดดิ้ง (CLADDING) และแคลดดิ้งนี้จะถูกหุ้มไว้ด้วยแจ็คเก็ต (JACKET) อีกชั้นหนึ่ง แกนของเส้นใยนำแสงจะคอยส่งผ่านแสง โดยมีแคลดดิ้งเป็นตัวคอยป้องกัน เก็บคลื่นแสงไว้ให้อยู่ภายในแกนและช่วยให้แกนมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่วนแจ็คเก็ตจะคอยป้องกันความชื้น, รอยขีดข่วน, รอยสึก ที่อาจเกิดกับเส้นใยนำแสงได้



รูป 3.27 แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง

แกนและแคลดดิ้งทำจากวัสดุจำพวกแก้วหรือพลาสติก แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

1. แกนและแคลดดิ้งเป็นพลาสติก
2. แกนและแคลดดิ้งเป็นแก้ว
3. แกนเป็นแก้ว แคลดดิ้งเป็นพลาสติก

ในกรณีที่เป็นพลาสติก แกนจะเป็นพวกโพลีสเตอีน (POLYSTYRENE) หรือ โพลีเมททอลเมทาคริลเลต (POLYMETHYL METHACRYLATE) ส่วนแกนเคลดคั้งโดยทั่วไปเป็นพวกซิลิโคน (SILICONE) หรือ เทฟลอน (TEFLON)

ถ้าเป็นแก้วจะต้องมีความบริสุทธิ์มาก อย่างไรก็ตามเราอาจเจือปนโบรอน, เจอร์มันเนียม หรือฟอสฟอรัสได้เล็กน้อย ซึ่งสารพวกนี้จะทำให้ดัชนีการหักเหของแสงเปลี่ยนแปลงไป โบรอนออกไซด์เมื่อนำมาเจือปนกับซิลิกาจะเกิดเป็นแก้วโบโรซิลิเกต (BOROSILICATE GLASS) ซึ่งเป็นเคลดคั้งของเส้นใยนำแสง เพื่อทำให้เส้นใยนำแสงมีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าเดิม นักวิทยาศาสตร์ของห้องทดลองเบลล์ (BELL LAB) ได้ทำการทดลองกับสังกะสีคลอไรด์ (ZINC CHLORIDE) ซึ่งมีซิลิกา ปรากฏว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าเส้นใยนำแสงแบบซิลิกาถึง 1,000 เท่า

ในการเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยนำแสงแบบแก้ว กับ แบบพลาสติก แบบพลาสติกมีความยืดหยุ่น, ราคาถูก, ง่ายในการติดตั้ง และการติดต่อ อีกทั้งสามารถทนความเค้น (STRESS) ได้มากกว่าแบบแก้ว และมีน้ำหนักเพียง 40% ของเส้นใยนำแสงแบบแก้ว แต่อย่างไรก็ตาม แบบพลาสติกไม่สามารถส่งแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีการสูญเสียในสายสูง ซึ่งจะใช้กับระยะทางสั้นๆ เท่านั้น เช่น ภายในอาคาร เป็นต้น เส้นใยนำแสงที่มีแกนเป็นแก้วได้นำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง มากกว่าแบบพลาสติก

### 3.2.2 ชนิดของเส้นใยนำแสง

วิธีการแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงมีหลายวิธีกล่าวคือ

- แบ่งตามชนิดของสารไดอิเล็กตริกที่ใช้

1. QUARTZ GLASS FIBER
2. MULTICOMPONENT FIBER
3. PLASTIC CLAD FIBER
4. HIGH POLYMER (PLASTIC FIBER)
5. SINGLE MATERIAL
6. LIQUID CORE FIBER

- แบ่งตามจำนวน PROPAGATION MODE

1. SINGLE MODE FIBER
2. MULTI MODE FIBER

- แบ่งตามลักษณะของดัชนีการหักเห

1. STEP INDEX
2. GRADED INDEX

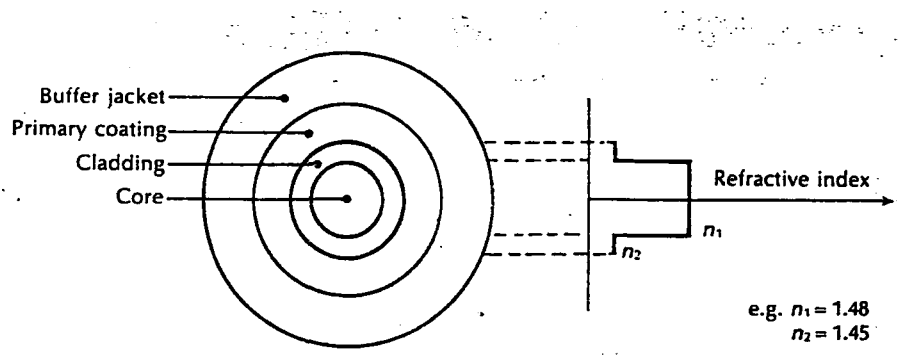
- แบ่งตามวิธีการผลิต

1. INTERNAL CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION(C.V.D.)METHOD
2. EXTERNAL C.V.D. METHOD
3. PLASMA C.V.D. METHOD
4. DOUBLE CRUIABLE METHOD
5. VAPOUR AXIAL DEPOSITION(V.A.D.)METHOD
6. ROD IN TUBE METHOD

ในที่นี้เราจะกล่าวถึงเส้นใยนำแสงชนิดที่พบเห็นอยู่ทั่วไป คือ

1. เส้นใยนำแสงแบบ MULTIMODE STEP INDEX

สร้างได้จากสารประกอบ MULTI COMPONENT GLASS หรือ การโด๊ปซิลิกา มีค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของ CORE กว้างและค่า NA มาก เพื่อความสะดวกในการต่อไปที่แหล่งกำเนิดแสง incoherent ให้มีประสิทธิภาพเช่น LEDs ลักษณะของไฟเบอร์ชนิดนี้ที่สำคัญมาก ขึ้นกับวัสดุที่ใช้และวิธีการผลิต MULTI COMPONENT GLASS และไฟเบอร์ที่โด๊ปซิลิกา ส่วนใหญ่จะอ้างเป็น MULTI COMPONENT glass/glass (glass-clad glass) และ silica/silica (silica-clad silica) ตามลำดับ โครงสร้างของเส้นใยนำแสง MULTIMODE STEP INDEX แสดงดังรูป 3.28



รูป 3.28 แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง MULTIMODE STEP INDEX

โครงสร้าง

เส้นผ่าศูนย์กลางของ CORE	50 - 400 $\mu\text{m}$
เส้นผ่าศูนย์กลางของ CLAD	125 - 500 $\mu\text{m}$
เส้นผ่าศูนย์กลางของ JACKET	250 - 1,000 $\mu\text{m}$
ค่า NUMERICAL APERTURE	0.16 - 0.5

ลักษณะของเส้นใยนำแสง

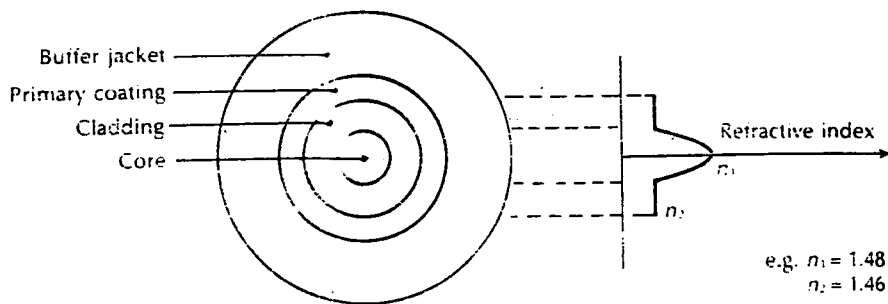
ATTENUATION : 2.6 - 50 dB Km<sup>-1</sup> ที่ความยาวคลื่น 0.85 $\mu\text{m}$  ถูกจำกัดโดยการดูดกลืนหรือการกระเจิง ความเปลี่ยนแปลงที่กว้างในคุณสมบัติการลดทอนเกิดขึ้นจากผลต่างของค่าภายในและค่าระหว่าง 2 ชั้นตอนทั้งหมด

BANDWIDTH : 6 - 50 MHz Km

APPLICATION : เส้นใยนำแสงนี้เป็นแบบที่ดัดที่สุดสำหรับ short-haul, จำกัดแบนวิดท์ และการประยุกต์ใช้ค่าความสัมพันธ์ต่ำ

## 2. เส้นใยนำแสงแบบ MULTIMODE GRADED INDEX

สร้างจาก MULTI COMPONENT GLASS หรือการได้ปฏิกิริยาอย่างใดก็ตาม เส้นใยนำแสง MULTIMODE GRADED INDEX สามารถทำจากวัสดุที่มีสารเจือมากกว่าสาร majority ของเส้นใยนำแสง MULTIMODE STEP INDEX ในการเกิดการสูญเสียในเส้นใยแสง ลักษณะของเส้นใยนำแสง MULTIMODE GRADED INDEX มีคุณสมบัติดีกว่าชนิด STEP INDEX เพราะค่าดัชนี grading และคุณสมบัติการลดทอนต่ำมาก เส้นใยนำแสง MULTIMODE GRADED INDEX มีขนาด CORE เล็กกว่าเส้นใยนำแสง MULTI STEP INDEX มาก โครงสร้างของเส้นใยนำแสง MULTIMODE GRADED INDEX แสดงดังรูป 3.29



รูป 3.29 แสดงโครงสร้างเส้นใยนำแสง MULTIMODE GRADED INDEX

### โครงสร้าง

เส้นผ่าศูนย์กลางของ CORE	30 - 100 $\mu\text{m}$
เส้นผ่าศูนย์กลางของ CLAD	100 - 150 $\mu\text{m}$
เส้นผ่าศูนย์กลางของ JACKET	250 - 1,000 $\mu\text{m}$
ค่า NUMERICAL APERTURE	0.2 - 0.3

ลักษณะของเส้นใยนำแสง

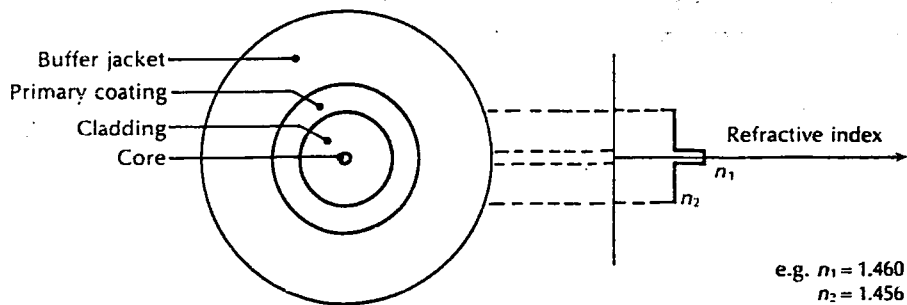
ATTENUATION : 2 - 10 dB Km<sup>-1</sup> ที่ความยาวคลื่น 0.85 μm ด้วยการจำกัดการกระเจิง การสูญเสียเฉลี่ยของบริเวณรอบ ๆ เป็น 0.4 dB Km<sup>-1</sup> ที่ความยาวคลื่น 1.3 μm และ 0.25 dB Km<sup>-1</sup> ที่ความยาวคลื่น 1.55 μm

BANDWIDTH : 300 MHz Km - 3 GHz Km

APPLICATION : เส้นใยนำแสงนี้เป็นแบบที่ดีที่สุดสำหรับ medium-haul medium-high bandwidth ใช้ incoherent และ coherent multimode sources (คือ LED และ INJECTION LASERS ตามลำดับ)

3. เส้นใยนำแสงแบบ SINGLE MODE

เส้นใยนำแสงแบบ SINGLE MODE เป็นได้ทั้ง STEP INDEX และ GRADED INDEX ประโยชน์ของการใช้ GRADED INDEX ทำให้เกิดการแพร่กระจายมีการเปลี่ยนแปลงในเส้นใยนำแสงแบบ SINGLE MODE แม้ว่าจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กก็ตาม โครงสร้างของเส้นใยนำแสงแบบ SINGLEMODE แสดงดังรูป 3.30



รูป 3.30 แสดงเส้นใยนำแสงแบบ SINGLEMODE

โครงสร้าง

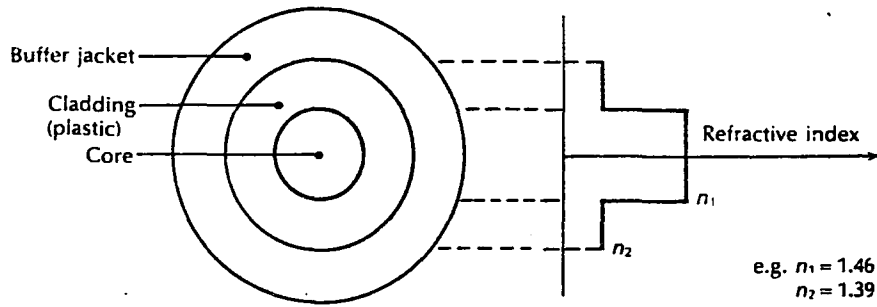
เส้นผ่าศูนย์กลางของ CORE	5 - 10 $\mu\text{m}$
เส้นผ่าศูนย์กลางของ CLAD	ประมาณ 125 $\mu\text{m}$
เส้นผ่าศูนย์กลางของ JACKET	250 - 1,000 $\mu\text{m}$
ค่า NUMERICAL APERTURE	0.08 - 0.15, ประมาณ 0.10

ลักษณะของเส้นใยนำแสง

- ATTENUATION : 2 - 5 dB Km<sup>-1</sup> ที่ความยาวคลื่น 0.85  $\mu\text{m}$  ด้วยการจำกัดการกระเจิงของบริเวณรอบๆ 1 dB Km<sup>-1</sup> ค่าการสูญเสียเฉลี่ย 0.35 และ 0.21 dB Km<sup>-1</sup> ที่ความยาวคลื่น 1.3 และ 1.55  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ
- BANDWIDTH : มีขนาดใหญ่สุด 500 MHz Km ตามทฤษฎีค่าแบนวิดท์จะถูกจำกัดโดย รูปคลื่น และ วัสดุแพร่กระจายไป ประมาณ 40 GHz Km ที่ความยาวคลื่น 0.85  $\mu\text{m}$  อย่างไรก็ตาม ค่าแบนวิดท์ที่ใช้ได้จะมีค่าเกิน 10 GHz Km ที่ความยาวคลื่น 1.3  $\mu\text{m}$
- APPLICATION : เส้นใยนำแสงชนิดนี้เป็นแบบที่ดีที่สุดสำหรับ high bandwidth very long-haul ใช้กับแหล่งกำเนิด INJECTION LASER

4. เส้นใยนำแสงแบบ PLASTIC-CLAD

เป็น MULTIMODE และเป็นได้ทั้ง STEP INDEX และ GRADED INDEX โดยมี PLASTIC CLADDING และ GLASS CORE ส่วนมากเป็น ซิลิกา (เส้นใยนำแสง PCS) เส้นใยนำแสงแบบ PLASTIC-CLAD เป็นแบบมีขนาดบาง มีคุณสมบัติอ่อนมากเมื่อเทียบกับเส้นใยนำแสงที่ทำจากแก้ว โครงสร้างของเส้นใยนำแสง PLASTIC-CLAD ในแบบ STEP INDEX แสดงดังรูป 3.31



รูป 3.31 แสดงเส้นใยนำแสง PLASTIC-CLAD แบบ STEP INDEX

โครงสร้าง

เส้นผ่าศูนย์กลางของ CORE	แบบ STEP INDEX	100 - 500 $\mu\text{m}$
	แบบ GRADED INDEX	50 - 100 $\mu\text{m}$
เส้นผ่าศูนย์กลางของ CLAD	แบบ STEP INDEX	300 - 800 $\mu\text{m}$
	แบบ GRADED INDEX	125 - 150 $\mu\text{m}$
เส้นผ่าศูนย์กลางของ JACKET	แบบ STEP INDEX	500 - 1,000 $\mu\text{m}$
	แบบ GRADED INDEX	250 - 1,000 $\mu\text{m}$
ค่า NUMERICAL APERTURE	แบบ STEP INDEX	0.2 - 0.5
	แบบ GRADED INDEX	0.2 - 0.3

ลักษณะของเส้นใยนำแสง

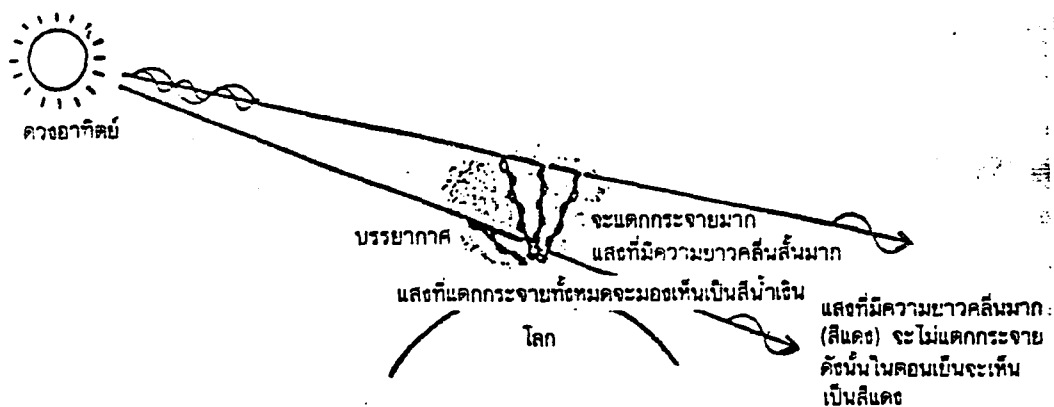
ATTENUATION	แบบ STEP INDEX	: 5 - 50 $\text{dB Km}^{-1}$
	แบบ GRADED INDEX	: 4 - 15 $\text{dB Km}^{-1}$

### 3.3 การสูญเสียแสง

การสูญเสียแสงในเส้นใยนำแสง เป็นการแสดงว่าส่วนหนึ่งของพลังงานแสงที่เดินทางไปในเส้นใยนำแสงนั้นทะลุออกไปนอกเส้นใยนำแสงบ้าง และถูกดูดกลืนในเส้นใยนำแสงบ้าง ทำให้พลังงานของแสงลดน้อยลง สามารถแบ่งออกเป็นพวกใหญ่ๆ ได้ 2 พวก คือ พวกที่เกิดขึ้นในตัวของเส้นใยนำแสง ได้แก่ การสูญเสียอันเนื่องมาจากการกระจายระจายแสง (SCATTERING LOSS) การสูญเสียอันเนื่องมาจากการดูดแสงของสารที่มีอยู่ในเส้นใยนำแสง เป็นต้น การสูญเสียพวกนี้เรียกว่า FIXED LOSS ส่วนอีกพวกหนึ่งเป็นการสูญเสียที่เกิดจากโครงสร้างของเส้นใยนำแสงไม่สมบูรณ์ การสูญเสียที่เกิดจากแรงภายนอกมากกระทำ เป็นต้น การสูญเสียพวกนี้เรียกว่า ADDITION LOSS ใน ADDITION LOSS นี้ยังมีการสูญเสียอันเนื่องมาจาก MICRO BENDING และการสูญเสียที่เกิดจากการบิดงอของเส้นใยนำแสงอีกด้วย ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของการสูญเสียต่างๆดังต่อไปนี้

#### 1. การสูญเสียอันเนื่องมาจากการกระจายระจายแสง

การกระจายระจายของแสงนั้น เหมือนกันกับการแตกกระจายของจานกระเบื้องที่ปาก้อนหินใส่ มันจะแตกกระจายออกไปทุกทิศทุกทาง แสงเมื่อกระทบกับวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสงจะเกิดปรากฏการณ์แตกกระจายออกทุกทิศทุกทาง การที่เรามองเห็นท้องฟ้าเป็นสีน้ำเงินก็ดี ในตอนพระอาทิตย์ใกล้จะตกดินเราเห็นท้องฟ้าเป็นสีแดงก็ดี ล้วนแล้วเกิดจากการกระจายระจายของแสงทั้งนั้น ขนาดของการกระจายระจายแสงนี้จะเป็น



รูป 3.32 แสดงปรากฏการณ์การแตกกระจายของแสงโดยบรรยากาศ

สัดส่วนกับ  $1/\lambda^4$  ( $\lambda$ : ความยาวคลื่น) ดังนั้นแสงสีน้ำเงิน (มีความยาวคลื่นประมาณ  $0.4 \mu\text{m}$ ) จะมีขนาดการกระจัดกระจายมากกว่าแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น ประมาณ  $0.7 \mu\text{m}$  การกระจัดกระจายแสงชนิดนี้เรียกว่า RAYLEIGH SCATTERING โดยเรียกตามชื่อของนักฟิสิกส์ชื่อ RAYLEIGH ที่เป็นผู้อธิบายปรากฏการณ์นี้ ปรากฏการณ์ RAYLEIGH SCATTERING ในบรรยากาศแสดงดังรูป 3.32 ในตอนกลางวันการที่เรามองเห็นท้องฟ้าเป็นสีน้ำเงิน ก็เพราะว่าแสงจากดวงอาทิตย์ถูกบรรยากาศรอบผิวโลก ทำให้แตกกระจายกระจายออกทุกทิศทุกทางและเรามองเห็นแสงที่แตกกระจายนั้น และเนื่องจากขนาดการกระจัดกระจายแสงจะมีค่ามาก ถ้าความยาวคลื่นมีค่าน้อย (นั่นคือ แสงที่มีสีใกล้เคียงกับสีม่วง) ดังนั้น แสงสีแดงซึ่งมีความยาวคลื่นมากจะมีขนาดการกระจัดกระจายแสงน้อย ทำให้เรามองเห็นท้องฟ้าเป็นสีน้ำเงินทั้งหมด สำหรับผิวดวงจันทร์ ซึ่งไม่มีบรรยากาศนั้นจะไม่เกิดการกระจัดกระจายแสงเลย ดังนั้นแม้ในเวลากลางวันที่ดวงอาทิตย์ส่องแสงอยู่ก็ตาม แต่จะมีมืดไปหมด อนึ่ง ในตอนเช้าและตอนเย็นที่เรามองเห็นท้องฟ้าเป็นสีแดง ก็เพราะว่าดวงอาทิตย์โคจรมาอยู่ใกล้เส้นระดับสายตา ทำให้ระยะทางที่แสงเดินทางผ่านบรรยากาศมากกว่าตอนกลางวัน (ดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะเราพอดี) และเราจะมองเห็นแสงที่เกิดการสูญเสียภายหลังจากการกระจัดกระจายแล้ว แสงสีแดงนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับแสงสีน้ำเงิน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นจะมีการสูญเสียน้อยกว่า ทำให้มองเห็นเป็นสีแดง

RAYLEIGH SCATTERING ในเส้นใยนำแสงเป็นการกระจัดกระจายแสงที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของความร้อนในตอนผลิตเส้นใยนำแสง (กล่าวคือเมื่อเส้นใยนำแสงแข็งตัวจะทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่น และส่วนประกอบที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าความยาวคลื่นแสงกล่าวได้ว่า RAYLEIGH SCATTERING นี้เป็นสาเหตุของการเกิดการสูญเสียแสงที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

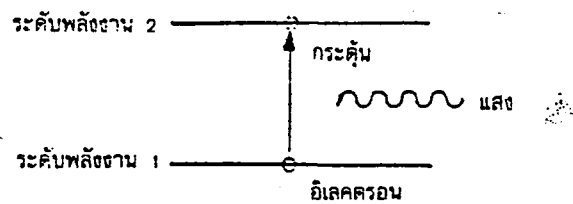
## 2. การสูญเสียแสงเนื่องจากการดูดแสง

สำหรับการดูดแสงในเส้นใยนำแสงนั้น เป็นการดูดแสงของ  $\text{SiO}_2$  (SILICA) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของเส้นใยนำแสง และการดูดแสงของสารประกอบอื่น ๆ การดูดแสงของซิลิกา นั้น จะมีมากต่อแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต (ความยาวคลื่นต่ำกว่า  $0.3 \mu\text{m}$ ) และแสงในย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่นมากกว่า  $0.8 \mu\text{m}$ ) และจะมีการดูดแสงน้อยมากสำหรับแสงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งใช้ในการสื่อสารเส้นใยนำแสง (ได้แก่ แสงสีม่วง

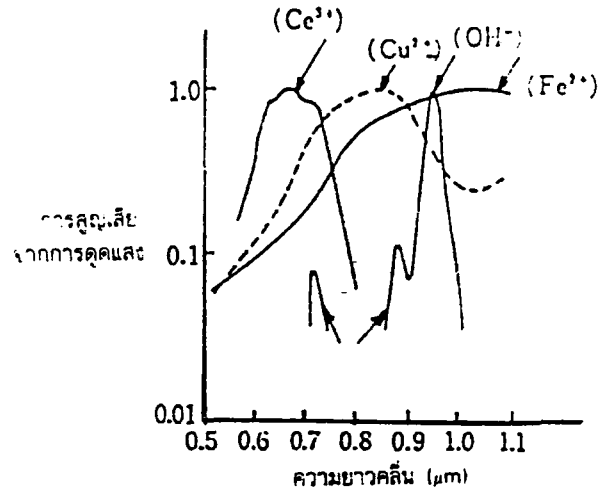
ความยาวคลื่น  $0.3 \mu\text{m}$  ไปจนถึงแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น  $0.7 \mu\text{m}$  และแสงที่ตามองไม่เห็นจากช่วง NEAR INFRARED (ความยาวคลื่นจาก  $0.8 \mu\text{m}$  ไปจนถึง  $1.6 \mu\text{m}$ )

ปรากฏการณ์การดูดแสงเกิดขึ้นโดยกลไกดังต่อไปนี้

อะตอมที่ประกอบอยู่ในโมเลกุลของซิลิกาและสารอื่นๆ นั้นจะประกอบด้วย นิวเคลียสและอิเล็กตรอน พลังงานของอิเล็กตรอนนั้นมีค่าต่างๆกัน (เรียกว่า ระดับพลังงาน) เมื่อมีแสงมากระทบโมเลกุล พลังงานจากแสง จะไปจ่ายให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นด้วยส่วนพลังงานที่ได้รับจากแสง และเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การกระตุ้น (STIMULATION) ให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานหนึ่งเลื่อนขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูงกว่า พลังงานของแสงกำหนดด้วยความยาวคลื่น ความยาวคลื่นยิ่งมีค่าน้อยจะยิ่งมีพลังงานมาก ซึ่งเห็นได้จากตัวอย่างจริงที่เป็นสาเหตุของผิวไหม้ต่อนอบแดด ที่เกิดจากแสงอุลตราไวโอเล็ต ที่มีความยาวคลื่นสั้นเป็นตัวทำให้ผิวไหม้ดำได้ รูป 3.33 แสดงปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนดูดพลังงานจากแสงและถูกกระตุ้นให้เลื่อนไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า



รูป 3.33 แสดงปรากฏการณ์การดูดแสง



รูป 3.34 แสดงการสูญเสียจากการดูดแสงของไอออนต่างๆ

การดูดพลังงาน อันเนื่องมาจากการกระตุ้นของอิเล็กตรอนนี้ ไม่เกิดแต่เฉพาะในโมเลกุลเท่านั้น แต่จะเกิดกับอิเล็กตรอนในไอออนและอะตอมด้วย เนื่องจากแสงที่มีความยาวคลื่นซึ่งมีพลังงานเท่ากับผลต่างของพลังงานระหว่างระดับพลังงานของอิเล็กตรอนถูกดูด ดังนั้น การสูญเสียของแสงจากการดูดแสงจะมีค่าต่างกันตามความยาวคลื่นแสง รูป 3.34 นี้แสดงการสูญเสียจากการดูดแสงของไอออนต่างๆ ที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสง กรณีที่ความหนาแน่นของไอออนมีค่าเท่ากัน ในขั้นตอนการผลิตเส้นใยนำแสง จะมีปัญหาเกี่ยวกับการกำจัดไอออนของสารที่ไม่ต้องการเหล่านี้

ไอออนของสารที่เป็นปัญหามากที่สุด ในการผลิตเส้นใยนำแสงคือ การดูดแสงของน้ำ ( $\text{OH}^-$  ION) แก้วที่ขายทั่วไปนั้น ปกติจะมีน้ำหรือ  $\text{OH}^-$  ไอออน ปนอยู่มากกว่า 100 ppm (หรือมีความหนาแน่น 1/10,000 โดยอัตราส่วนน้ำหนัก) จะแสดงผลการดูดแสงอย่างมาก ต่อแสงที่มีความยาวคลื่น 2.73  $\mu\text{m}$  (อยู่ในย่านอินฟราเรด) การดูดแสงอันเนื่องมาจาก  $\text{OH}^-$  BASE ในย่านความยาวคลื่นนี้ เรียกว่า FIRST ABSORPTION BAND ความยาวคลื่นที่สั้นกว่านี้ได้แก่ 1.38  $\mu\text{m}$ , 0.95  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นฮาร์โมนิกส์ของความยาวคลื่น 2.7  $\mu\text{m}$  จะมีการดูดแสงสูงมาก สภาพการดูดแสงอันเนื่องมาจาก  $\text{OH}^-$  ไอออน ( $\text{OH}^-$  BASE) ของแก้วซิลิกา แสดงดังตาราง 3.1

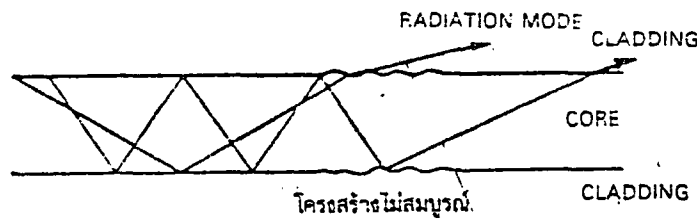
ตาราง 3.1 แสดงการดูดแสงอันเนื่องมาจาก OH-BASE ของแก้วซิลิกา

ความยาวคลื่นแสง ( $\mu\text{m}$ )	VIBRATION	RELATIVE LOSS
0.945	$\text{OH}^3$	1
1.13	$\text{SiO}_2 + \text{OH}^2$	0.11
1.24	$\text{SiO}_2 + \text{OH}^2$	2.8
1.38	$\text{OH}^2$	65
1.90	$\text{SiO}_2 + \text{OH}^1$	10
2.22	$\text{SiO}_2 + \text{OH}^1$	260
2.73	$\text{OH}^1$	1000

เนื่องจากการสูญเสียจากการดูดแสงอันเนื่องมาจาก OH-BASE 1ppm นั้น ที่ความยาวคลื่น 0.95  $\mu\text{m}$  มีค่าประมาณ 1 dB/Km ดังนั้นค่า RELATIVE LOSS จึงแสดงการสูญเสียจากการดูดของเส้นใยนำแสงของกรที่มี OH-BASE ตกค้างอยู่ 1ppm และจากตาราง 3.1 เลข 1 ของ OH แสดง FIRST ABSORPTION BAND, เลข 2 ของ OH แสดง SECOND ABSORPTION BAND, เลข 3 ของ OH แสดง THIRD ABSORPTION BAND

### 3. การสูญเสียเนื่องจากโครงสร้างเส้นใยนำแสงไม่สมบูรณ์

เป็นการสูญเสียแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของรอยต่อ CORE กับ CLAD และความไม่สม่ำเสมอทางโครงสร้างของภายในเส้นใยนำแสงดังแสดงในรูป 3.35 เมื่อเกิดความไม่สม่ำเสมออย่างนี้ขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนโหมด ทำให้ส่วนหนึ่งของพลังงานทะลุ CORE ออกไปกลายเป็น RADIATION MODE เป็นผลให้การสูญเสียแสงเพิ่มขึ้น การสูญเสียอย่างนี้สามารถลดลงได้ โดยปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตเส้นใยนำแสง ดังนั้นโดยการผลิตที่มีการควบคุมอย่างดีนั้น ในปัจจุบันสามารถการสูญเสียแสงลงได้ประมาณ 0.02 ถึง 0.2 dB/Km



รูป 3.35 แสดงการเกิดการสูญเสียจากโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์

#### 4. MICRO BENDING LOSS

เป็นการสูญเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนโหมด เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างของเส้นใยนำแสง เช่นเดียวกับกับการสูญเสียอันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ทางโครงสร้าง การสูญเสียอันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ทางโครงสร้างตามที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 3 นั้นเกิดจากขั้นตอนของการผลิตเส้นใยนำแสง แต่ MICRO BENDING LOSS นั้นเกิดขึ้น ภายหลังจากการผลิตเส้นใยนำแสง กล่าวคือ เมื่อมีแรงดันมากกระทำที่ด้านข้างของเส้นใยนำแสง จะทำให้แกนของเส้นใยนำแสงบิดงอไปมีค่าเป็นไมโครเมตร เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียแสงขึ้น นั่นคือ ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นตอนที่แรงดึงแก่เส้นใยนำแสงเพื่อม้วนเส้นใยนำแสงเข้ากับหลอดสำหรับม้วนเส้นใยนำแสง หรือในตอนทำการหุ้มพลาสติกเส้นใยนำแสงซึ่งทำการหุ้มไม่เหมาะสม หรือหลังจากหุ้มพลาสติกแล้ว เส้นใยนำแสงได้รับการเปลี่ยนของอุณหภูมิอย่างมาก วิธีการลด MICRO BENDING LOSS ก็คือ ป้องกันอย่าให้มีแรงดันมากกระทำโดยตรงที่ด้านข้างของเส้นใยนำแสง โดยการเพิ่มชั้นกันการกระแทกเข้าไประหว่าง COVER ด้านนอกกับเส้นใยนำแสง เรียกว่า BUFFER LAYER หรือทำให้ COVER ด้านนอกมีลักษณะเป็นท่อหุ้ม และวิธีอื่นๆ

#### 5. การสูญเสียที่เกิดจากเส้นใยนำแสงบิดงอ (BENDING LOSS)

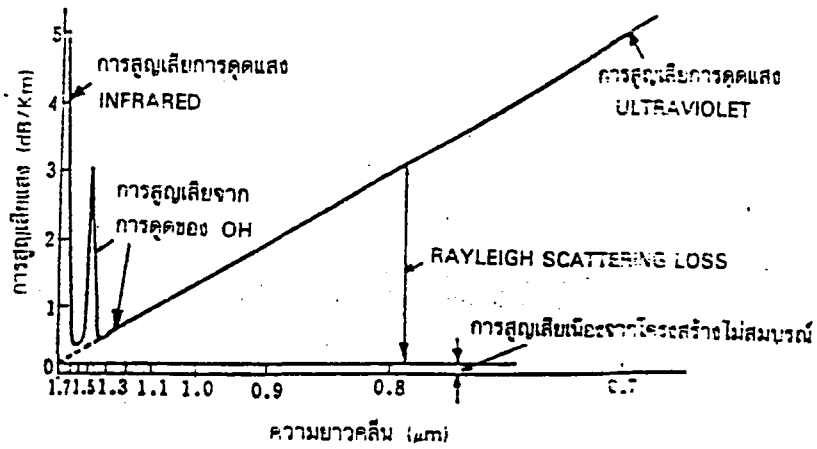
การสูญเสียนี้เกิดขึ้นตอนที่เส้นใยนำแสงบิดงอไป เป็นสิ่งจำเป็นที่ควรระมัดระวังตอนมัดเส้นใยนำแสงเพื่อทำเป็นเคเบิล นอกจากนั้นในการวางสายเคเบิลเส้นใยนำแสงหรือการต่อเชื่อมเส้นใยนำแสงก็ดี จำเป็นต้องระมัดระวังอย่าให้เส้นใยนำแสงบิดงอโค้งเกินกว่าค่ารัศมีการงอโค้งต่ำสุดที่ยอมให้บิดงอได้

6. ประวัติการทำให้การสูญเสียแสงลดน้อยลง

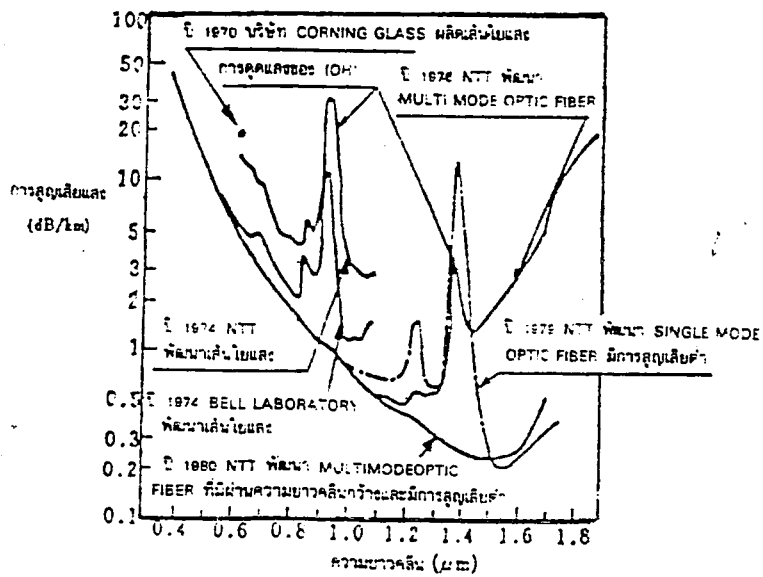
การสูญเสียแสงของเส้นใยนำแสงที่กล่าวข้างต้น นำมาสรุปรวมแสดงด้วยรูป  
ดังรูป 3.36 ซึ่งสามารถวิเคราะห์แยกสาเหตุของการทำให้เกิดการสูญเสีย ออกเป็นชนิด  
ต่างๆได้ จากรูปสังเกตว่าขนาดของ RAYLEIGH SCATTERING นั้นเป็นสัดส่วนกับ  
 $1/\lambda^4$  แขนงนอนของรูปแบ่งขีดเอาไว้เป็นค่าของ  $1/\lambda^4$  ดังนั้น ทำให้สามารถแสดง  
การสูญเสียแสง อันเนื่องมาจาก RAYLEIGH SCATTERING เป็นเส้นตรงได้ และเนื่อง  
จากการสูญเสีย อันเนื่องมาจากโครงสร้างเส้นใยนำแสงไม่สมบูรณ์นั้น ไม่ขึ้นอยู่กับความ  
ยาวคลื่นจึงมีค่าคงที่ ส่วนการสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดกลืนนั้นแสดงด้วยเส้นตรง และ  
เคิร์ฟ ช่วยให้สามารถแยกชนิดของการสูญเสียได้ง่าย วิธีการแบบนี้เป็นวิธีการประเมินค่า  
คุณสมบัติเส้นใยนำแสงที่เสนอ โดยบริษัทผลิตเส้นใยนำแสง FUJIKURA ซึ่งมีประโยชน์มาก  
ในการตรวจแก้ไข ในขั้นตอนการผลิตเส้นใยนำแสง

รูป 3.36 นี้ แสดงคุณสมบัติการสูญเสียแสง กับความยาวคลื่นของเส้นใยนำแสง  
ที่ทำจากแก้วซิลิกาซึ่งเติมสารโด๊ปเจอร์มันเนียม และฟอสฟอรัส ลงไป

ประวัติการพยายามทำให้การสูญเสียแสงในเส้นใยนำแสงลดน้อยลงนั้น แสดงดัง  
รูป 3.37 ซึ่งเป็นประวัติการทำให้การสูญเสียแสงจากการดูดกลืนของ OH-BASE  
ลดน้อยลง และการทำให้การสูญเสียจากการดูดกลืนน้อยลง โดยใช้สารโด๊ปที่เหมาะสม  
(เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อทำการควบคุมค่าดัชนีการหักเหของเส้นใยนำแสง)



รูป 3.36 แสดงคุณสมบัติการสูญเสียของเส้นใยนำแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ



รูป 3.37 แสดงประวัติการลดการสูญเสียของเส้นใยนำแสง

จากรูป 3.37 จะเห็นว่าในปี 1970 บริษัท CORNING GLASS ได้พัฒนาเส้นใยนำแสงที่มีการสูญเสีย 20dB/Km และ เมื่อเวลาผ่านไป 10 ปี คือในปี 1980 บริษัท NTT แห่งประเทศญี่ปุ่นได้พัฒนาเส้นใยนำแสงโดยผลิตด้วยวิธี VAD ใช้กับความยาวคลื่นช่วง 1.2 ถึง 1.7 $\mu$ m มีการสูญเสียต่ำมาก ต่ำกว่า 0.5 dB/Km ได้ นอกจากนั้น จากรูป 3.37 จะเห็นได้ว่า การสูญเสียจากการดูดแสงอินฟราเรดนั้น ถ้าหากสามารถเลื่อนไปทางความยาวคลื่นค่ามากๆได้ จะสามารถเลื่อนจุดตัดกับ RAYLEIGH SCATTERING ไปในบริเวณที่มีค่าต่ำได้นั้นคือ สามารถทำให้การสูญเสีย มีค่าต่ำมากๆได้นั่นเอง ดังนั้นในอนาคตเส้นใยนำแสงที่มีการสูญเสียต่ำมาก ๆ นั้น ได้มีการวิจัยและพัฒนาเส้นใยนำแสงอย่างอื่นที่ทำจากพวกฟลูออไรด์ ใช้ในย่านความยาวคลื่น 2 ถึง 3  $\mu$ m

### 3.4 ความแตกต่างระหว่างเส้นใยนำแสงกับเคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำ

เส้นใยนำแสงเป็นสายส่งสำหรับยุคใหม่ที่มีข้อดีต่าง ๆ ซึ่งไม่มีในสายส่งที่ทำด้วยโลหะตัวนำดังนั้นต่อไปนี้จะพูดถึงการเดินทางของคลื่นในเคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำสักเล็กน้อย เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาว่ามันแตกต่างกับเส้นใยนำแสงอย่างไรบ้าง

#### 1. การเดินทางของคลื่นในเคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำ

โครงสร้างของเคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำแบ่งออกเป็นพวกใหญ่ๆ ได้ 2 พวกคือพวกที่ใช้สายตัวนำ 2 สายมาวางขนานกัน เรียกว่า BALANCED PAIR CABLE กับพวกที่มีหน้าตัดเป็นวงกลมโดยจัดให้มีจุดศูนย์กลางร่วมกันเรียกว่า COAXIAL CABLE และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเดินทางไปในเคเบิลทั้ง 2 พวกนี้ได้ก็คือ TEM เท่านั้น คลื่น TEM นี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่มีส่วนของสนามแม่เหล็กและไฟฟ้าอยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่เลย คุณสมบัติการส่งของเคเบิลเหล่านี้จะเป็นคุณสมบัติการส่งของคลื่น TEM นั้นเอง กล่าวอีกอย่างก็คือเป็นสายส่งแบบ SINGLE MODE นอกจากนี้ยังมี SKIN EFFECT ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เป็นลักษณะพิเศษมากของเคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำ ปรากฏการณ์นี้คือกระแสที่ไหลในตัวนำเมื่อความถี่ของกระแสสูงขึ้น มันจะไปรวมกันอยู่ที่ผิวของตัวนำเป็นเหตุให้บริเวณการไหลของกระแสลดลง และความต้านทานเพิ่มขึ้นในกรณีนี้บริเวณการไหลของกระแส (หรือความลึกจากผิวของตัวนำไฟฟ้า) จะแคบลงเป็นส่วนกลับกับกรณฑ์ที่ 2 ของความถี่ทำให้ปริมาณการลดทอนกำลังของเคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำเพิ่มขึ้นเป็นส่วนกลับกับกรณฑ์ที่ 2 ของความถี่ นอกจากนั้น คุณสมบัติการลดทอนกำลังของเคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำกำหนดด้วยความถี่

กรณีที่ทำกาการส่งเป็นระยะทางไกลนั้น โดยทั่วไปแล้วจะใช้ REPEATER ในระหว่างสายส่ง เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ถูกลดทอนกำลังลงให้มีค่าสูงขึ้น สำหรับเคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำ เงื่อนไขสำคัญก็คือคุณสมบัติความถี่ของ GAIN ของ REPEATER จะต้องไปชดเชยการลดทอนกำลังตามความถี่ของสายส่ง นอกจากนี้ในเคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำยังมีปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ELECTROMAGNETIC COUPLING เป็นปรากฏการณ์เมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ภายนอกตัวนำแล้วตัวนำนั้น จะได้รับผลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นกรณีที่ได้รับ การรบกวนจากสายไฟฟ้าแรงสูง ฟ้าผ่า คลื่นวิทยุกระจายเสียง และ อื่นๆ เรียกว่า

EXTERNAL INDUCTION และกรณีที่ได้รับผลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำการส่งอยู่ในสายส่งที่อยู่ใกล้เคียงกัน เรียกว่า CROSS TALK

## 2. การส่งด้วยเส้นใยนำแสง

ระบบการส่งเส้นใยนำแสง จะทำการส่งแสงที่เปลี่ยนแปลงความเข้มตามสัญญาณอินพุตเข้าไปในเส้นใยนำแสง เป็นระบบที่ทำการส่งข่าวสารโดยความเข้มมากและเข้มน้อยของแสง สำหรับเส้นใยนำแสงแบบ MULTIMODE จะมีค่าโหมดของการแพร่จำนวนมากที่ถูกส่งไป และสัญญาณที่มีความเข้มมาก และน้อยของแสงจะถูกส่งไปกับโหมดของการแพร่ทั้งหมด ดังนั้นในกรณีพิจารณาการส่งด้วยเส้นใยนำแสงแบบ MULTIMODE จำเป็นต้องประเมินค่า คุณสมบัติรวมของโหมดของการแพร่เหล่านี้

อนึ่ง สำหรับแต่ละโหมดของการแพร่นั้นจะมีเวลาการเดินทาง ปริมาณการลดทอนกำลังและอื่น ๆ แตกต่างกันไป นอกจากนั้นยังเกิดการเปลี่ยนโหมด ในระหว่างทางของเส้นใยนำแสงทำการกระจายระหว่างโหมดเปลี่ยนแปลง จากสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ ในเส้นใยนำแสงแบบ MULTIMODE ที่จำเป็นต้องประเมินค่าคุณสมบัติของโหมดของการแพร่ทั้งหมดนี้ ทำให้การประเมินค่าคุณสมบัติการส่งยุ่งยากซับซ้อนมาก นั่นคือ ในเส้นใยนำแสงแบบ MULTIMODE จะต้องประเมินว่าการกระจายโหมด จะเกิดเปลี่ยนแปลงเนื่องจากตำแหน่งในระหว่างทางของเส้นใยนำแสง ทำให้คุณสมบัติแตกต่างกันออกไปดังนั้นในการประเมินคุณสมบัติการส่งจำเป็นต้องทำให้เงื่อนไขการประเมินชัดเจนลงไป

## 3. การหลีกเลี่ยงจาก SKIN EFFECT

ในเคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำนั้นมี SKIN EFFECT เกิดขึ้น ทำให้ปริมาณการลดทอนกำลังเป็นสัดส่วนกับกรณีที่ 2 ของความถี่ที่ส่งไปในเคเบิล และ ทำให้คุณสมบัติการลดทอนกำลังเพิ่มขึ้น ปัญหานี้ถือเป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในกรณีที่ใช้เคเบิลที่ทำด้วยโลหะตัวนำ เพราะเป็นขีดจำกัดทางคุณสมบัติของโลหะตัวนำ

อนึ่ง สำหรับเส้นใยนำแสงนั้นไม่มี SKIN EFFECT ดังนั้นในการที่จะทำให้มีการสูญเสียต่ำ แบนวิดท์กว้างนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำให้ตัวนำโตขึ้น เหมือนอย่างกรณีของโลหะตัวนำ เพียงแต่มีขนาดโตเท่าเส้นผมมนุษย์เท่านั้น สามารถทำให้มีแบนวิดท์กว้างกว่า COAXIAL CABLE ด้วยเหตุนี้เส้นใยนำแสงจึงเป็นเคเบิลสำหรับการสื่อสารแห่งยุคใหม่ และคุณสมบัติการมีแบนวิดท์นี้ เป็นคุณสมบัติอันหนึ่งของเส้นใยนำแสงที่เหนือกว่า

### 3.5 คุณสมบัติทางเมคานิกส์ของเส้นใยนำแสง

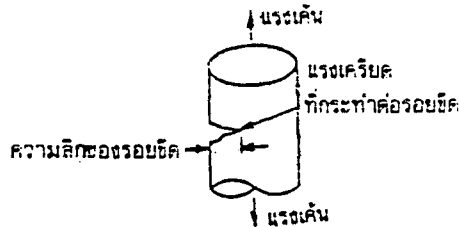
นอกจากคุณสมบัติการส่งของเส้นใยนำแสงแล้ว ยังมีคุณสมบัติทางเมคานิกส์ที่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญ เมื่อพิจารณาจากการนำไปใช้งานคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของแก้วที่ใช้ทำเส้นใยนำแสง เมื่อเปรียบเทียบกับทองแดง อะลูมิเนียม แอสดงดังตาราง 3.2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทนต่อแรงดึงนั้น เมื่อเทียบกับเคเบิลที่ทำจากโลหะตัวนำแล้วแทบไม่มีปัญหาเลย แต่ทว่าเนื่องจากสำหรับเส้นใยนำแสงนั้น มีคุณสมบัติเปราะแตกหักง่าย ซึ่งเป็นคุณสมบัติประจำตัวของแก้ว จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงอย่างมาก ในที่นี้จะเน้นความแข็งแรงของเส้นใยนำแสง และจะกล่าวถึงคุณสมบัติทางเมคานิกส์ของเส้นใยนำแสง และระหว่างเส้นใยนำแสงกับโลหะตัวนำนั้น จะได้กล่าวเพิ่มเติมถึง ความแตกต่างกันอย่างมากของสมบัติความร้อนจำเพาะ, การนำความร้อน และอัตราการขยายตัวตามแนวเชิงเส้น

ตาราง 3.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของแก้ว (ซิลิกา)

	แก้ว SILICA	ทองแดง		อะลูมิเนียม	
		อ่อน	แข็ง	อ่อน	แข็ง
สัญลักษณ์ทางเคมี	SiO <sub>2</sub>	Cu		Al	
ความถ่วงจำเพาะ	2.20	8.89		2.70	
ความต้านทานจำเพาะ (μΩ-cm)	10×10 <sup>24</sup>	1.724	1.777	2.826	
ความนำไฟฟ้า (Z)	1.7×10 <sup>-19</sup>	100	97	61	
การทนแรงดึง (Kg·mm <sup>-2</sup> )	ประมาณ 300	20-27	35-47	6-11	15-20
สัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Kg·mm <sup>-2</sup> )	7.200	12.000		6.300	
สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามแนวเชิงเส้น (Kg/mm <sup>2</sup> )	0.5×10 <sup>-6</sup>	17×10 <sup>-5</sup>		23×10 <sup>-6</sup>	
ความร้อนจำเพาะ (Cal/°Cg)	0.20	0.092		0.21	
การนำความร้อน (Cal/°C <sub>cm</sub> S)	0.0035	0.923		0.487	
จุดหลอมเหลว (°C)	1.730	1.083		660	

### 1. รอยขีดข่วนและการทนแรงดึง

การทนแรงดึงของเส้นใยนำแสง ในปัจจุบันมีค่าสูงประมาณ 2 เท่าของเหล็กกล้า และมากกว่า 10 เท่าของทองแดง อะลูมิเนียม แต่ทว่าเนื่องจากที่ผิวด้านนอกของเส้นใยนำแสงมีรอยขีดข่วนอยู่ด้วย เปอร์เซ็นต์ของความน่าจะเป็นได้ค่าหนึ่ง เมื่อมีแรงดึงมากระทำต่อเส้นใยนำแสง จะทำให้ความเค้น (แรงต้านทานแรงดึงที่มากกระทำ) มารวมตัวกันที่รอยขีดข่วน และเมื่อมีค่ามากกว่าความเค้นที่ทนได้ของรอยขีดข่วนแล้ว จะขาดออกทันที ดูรูป 3.38 ประกอบ



รูป 3.38 แสดงรอยขีดของเส้นใยนำแสงและแรงดึง

MAURER แห่งบริษัท CORNING GLASS ได้รายงานว่า

- 1) ความเค้นที่ปลายของรอยขีดข่วนจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดึง
- 2) รอยขีดข่วนยิ่งลึกมากเท่าใด จะทำให้ความเค้นที่ทนได้ของเส้นใยนำแสงลดน้อยลงมากเท่านั้น (นั่นคือเส้นใยนำแสงจะแข็งแรงน้อยลง) หมายความว่า ความเค้นจะมีค่าแตกต่างกันตามความลึกของรอยขีดข่วน นั่นคือการทนแรงดึงทั้งหมดของเส้นใยนำแสงนั้น กำหนดจากความลึกมากที่สุดของรอยขีดข่วน ที่มีอยู่บนผิวของเส้นใยนำแสง โดยทั่วไปแล้ว รอยขีดข่วนจะกระจายอย่างสะเปะสะปะ อยู่ในแนวความยาวของเส้นใยนำแสง และเนื่องจากการทนแรงดึงของเส้นใยนำแสง กำหนดจากรอยขีดข่วนที่ลึกที่สุดของรอยขีดข่วนเหล่านี้ ดังนั้นความน่าจะเป็นที่เส้นใยนำแสงจะขาดออกด้วยความเค้น  $\sigma$  นั้นสามารถ

แสดงได้ด้วยสมการของ WAIBLE ดังต่อไปนี้

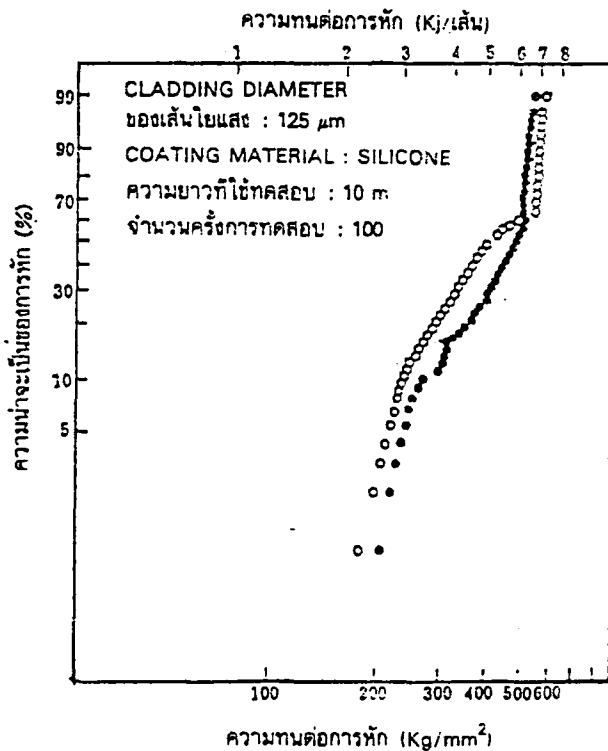
$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{x_0} \right)^m \cdot \frac{L}{L_0} \right] \dots\dots\dots (3.31)$$

ในที่นี้  $x$  เป็นความเค้นที่ทำให้ขาดออก

$L$  เป็นความยาวของเส้นใยนำแสง

$x_0, L_0, m$  เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆ

รูป 3.39 แสดงการตรวจคุณภาพแรงดึงของเส้นใยนำแสง ยาว 10 เมตร จำนวน 100 เส้น แล้วนำเอาความน่าจะเป็นของการขาดมาเขียนในรูปแสดงการกระจายแบบ WAIBLE ถ้าเป็นเส้นใยนำแสงที่ไม่มีรอยขีดข่วนบนผิวเลย ข้อมูลที่วัดได้จะเป็นเส้นตรง ส่วนเส้นใยนำแสงที่มีรอยขีดข่วนมาก ถ้าหากมีรอยขีดข่วนลึกมากเท่าใด จะทำให้เส้นใยนำแสงขาดด้วยแรงดึงค่าน้อยมาก ทำให้ข้อมูลที่วัดได้ไม่เป็นเส้นตรง



รูป 3.39 แสดงความน่าจะเป็นของการหักของเส้นใยนำแสง

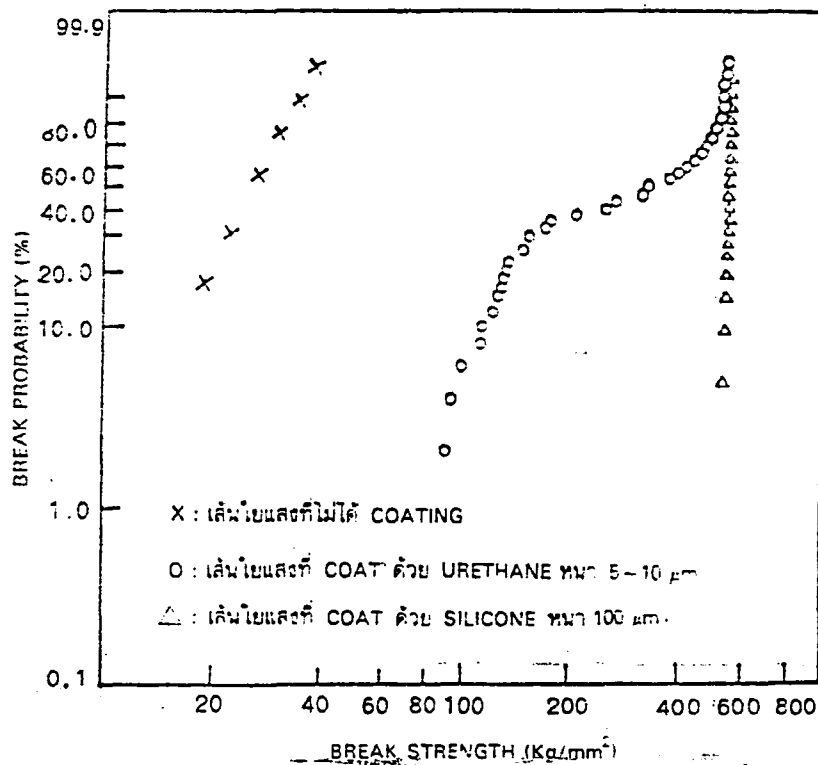
สำหรับสาเหตุการทำให้เกิดรอยขีดข่วนนั้นได้แก่

- กรณีที่ผลิตเส้นใยนำแสงด้วยวิธี C.V.D. รอยขีดข่วนจะมาจากตัวท่อแก้วซิลิกาเอง  
ในตอนเริ่มต้น

- เกิดจากสภาพสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ฝุ่นละอองภายในเตาให้ความร้อนเพื่อตั้งให้เป็น  
เส้นใยนำแสง, การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และอื่นๆ

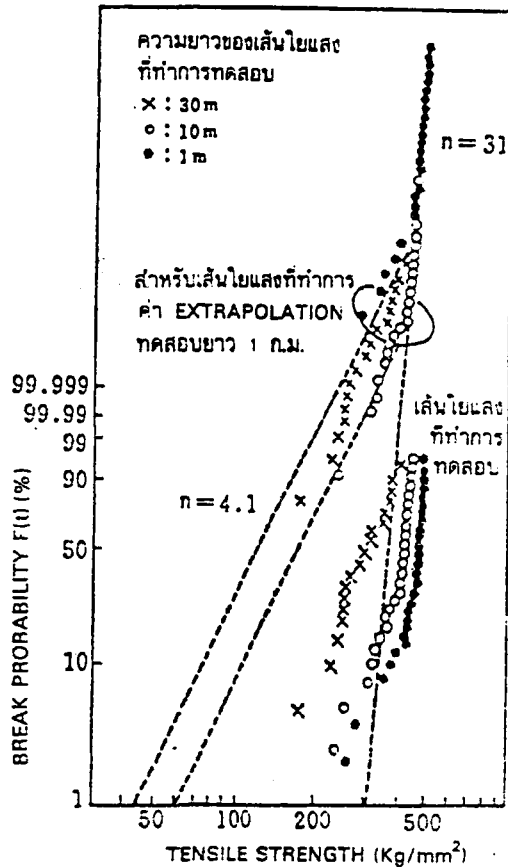
- มีสารอื่นไปถูกกับผิวด้านนอกของเส้นใยนำแสง

ในการกำจัดการเกิดรอยขีดข่วนเหล่านี้ จำเป็นต้องเลือกสารที่ใช้ผลิต ปรับปรุงวิธี  
การของขั้นตอนการผลิต เป็นต้น การเกิดรอยขีดข่วนจากการที่มีสารหรือของอื่นไปถูกกับ  
ผิวด้านนอกของเส้นใยนำแสงเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแก้ปัญหาที่กระทำ  
โดยการใช้เทคนิคการเอาพลาสติกหรือวัตถุอย่างอื่นไปหุ้มเส้นใยนำแสง หลังจากตั้งให้  
เป็นเส้นแล้ว (เรียกว่า COATING) จะให้ผลดีมากดังแสดงในรูป 3.40



รูป 3.40 แสดงผลของการ COATING

นอกจากนี้ การทนแรงดึงของเส้นใยน้ำแสง จะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของเส้นใยน้ำแสง กล่าวคือ เส้นใยน้ำแสงยิ่งยาวมากเท่าไร ยิ่งทำให้ความน่าจะเป็นในการเกิดรอยขีดข่วนมากขึ้นเท่านั้น จากสมการ (3.31) จะเห็นได้ว่า ความน่าจะเป็นของการขาดของน้ำหนักแรงดึงเท่ากันนั้น จะมีค่ามากขึ้นถ้าความยาวของเส้นใยน้ำแสงเพิ่มขึ้น ดังนั้นกรณีที่ทำการประเมินค่า การทนแรงดึงของเส้นใยน้ำแสงที่มีความยาวต่างกันนั้น ใช้ความสัมพันธ์ของสมการ (3.31) และจำเป็นต้องเปลี่ยนให้เป็นความน่าจะเป็นของการเกิดรอยขีดข่วนที่ความยาวเดียวกัน ตัวอย่างที่นำเส้นใยน้ำแสงทดสอบยาว 1 เมตร, 10 เมตร, 30 เมตร มาเปลี่ยนให้เป็นความยาว 1 กิโลเมตร แสดงดังรูป 3.41



รูป 3.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความน่าจะเป็นของการแตกหัก  
กับความยาวของเส้นใยน้ำแสง

## บทที่ 4

### การมอดูเลชัน

(Modulation)

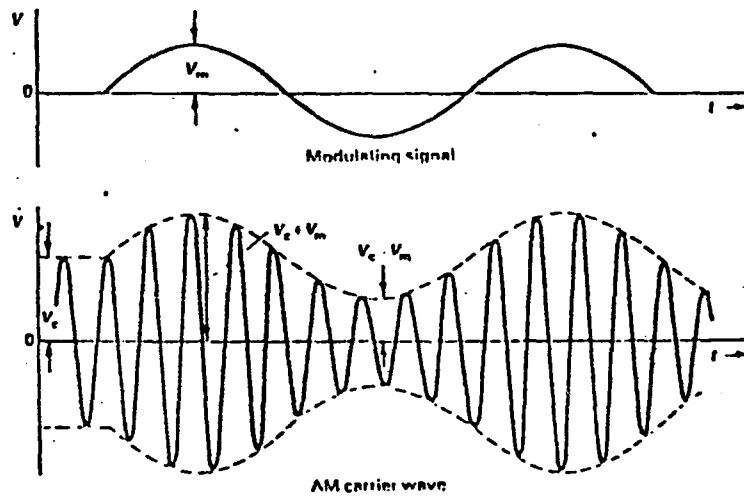
ในระบบการสื่อสาร สัญญาณที่จะนำไปมอดูเลตเรียกว่า สัญญาณมอดูเลตติ้ง (modulating) และคลื่นที่จะพาสัญญาณไปที่ไกล ๆ ได้เรียกว่า ตัวพา (carrier) เมื่อสัญญาณมอดูเลตติ้งมอดูเลตกับตัวพาแล้วสัญญาณที่ได้เรียกว่า สัญญาณถูกมอดูเลต ในปัจจุบันระบบมอดูเลชันที่ใช้ในการสื่อสารนั้นมียุคด้วยกันหลายระบบ แต่ละระบบมีชื่อเรียกตามลักษณะการมอดูเลตสัญญาณต่าง ๆ อย่างไรก็ตามระบบมอดูเลชันสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

1. ระบบมอดูเลชันแบบอะนาล็อก (analog modulation) ระบบนี้จะให้สัญญาณที่ถูกมอดูเลต (modulated signal) เป็นสัญญาณที่มีค่าต่อเนื่องแบบอะนาล็อก เช่น เอเอ็ม เอฟเอ็ม พีเอ็ม พัลส์มอดูเลชันต่าง ๆ เป็นต้น

2. ระบบมอดูเลชันแบบดิจิทัล (digital modulation) ระบบนี้จะให้สัญญาณที่ถูกมอดูเลตเป็นสัญญาณที่มีค่าเลขลงตัวแบบดิจิทัล เช่น พีซีเอ็ม เป็นต้น

#### 4.1 การมอดูเลต (modulation)

เมื่อพิจารณาความถี่ของคลื่นพาหะซึ่งมีความเร็ว  $v_c = V \sin \omega_c t$  โดยที่  $\omega_c = 2\pi f_c$  และ  $f_c$  คือความถี่ของคลื่นพาหะ ถ้าสัญญาณคลื่นมอดูเลตมีความเร็ว  $v_m = V \sin \omega_m t$  โดยที่  $\omega_m = 2\pi f_m$  และ  $f_m$  คือความถี่ของคลื่นที่นำมามอดูเลตจะได้คลื่นรวมดังรูปที่ 4.1 โดยแอมพลิจูดจะอยู่ในช่วง  $(V_c + V_m)$  และ  $(V_c - V_m)$



รูปที่ 4.1 แสดงการรวมกันของคลื่น

ถ้า  $V_c/V_m = m$  คือ modulation factor ดังนั้น  $V_m = m*V_c$  แทนค่าในสมการข้างต้นจะได้

$$v_c = (V_c + V_m \sin \omega_m t) \sin \omega_c t \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ถ้าคลื่นพาหะที่ใช้เป็นไฟกระแสดตรง จะได้  $V_c = v_c$  เมื่อแทนค่าจะได้

$$V_c = V_c + V_m \sin \omega_m t \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

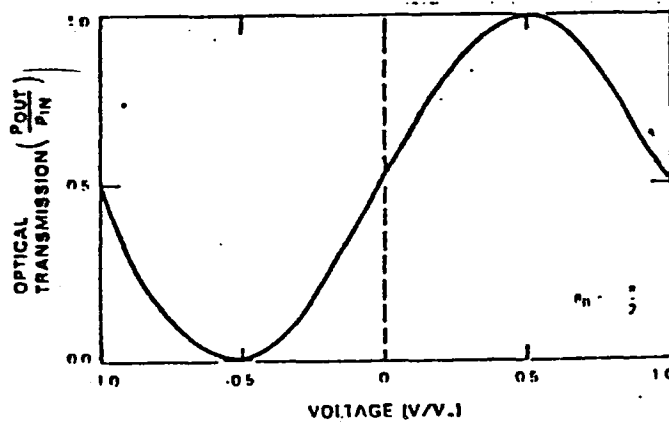
ในการส่งพลังงานแสงผ่านเส้นใยนำแสงนั้น อัตราส่วนของพลังงานที่ได้จะมีค่าเป็น

$$P_{out} / P_{in} = 1/2 [1 + \cos \Delta \phi] \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

โดยที่  $\Delta \phi$  คือความต่างเฟสของสัญญาณ

ถ้า  $\Delta\phi$  มีค่าเท่ากับ 0 จะได้สัญญาณที่มีความเข้มสูงสุด ในทำนองเดียวกัน ถ้า  $\Delta\phi = 180$  องศา จะได้สัญญาณที่มีความเข้มต่ำสุด modulation ลักษณะส่วนใหญ่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเชิงเส้นของ output power เมื่อให้ความต่างศักย์เข้าไป

จากรูปที่ 4.2 จะสังเกตได้ว่าที่ความต่างศักย์เป็นศูนย์ กำลังของสัญญาณมีกำลังเพียงครึ่งหนึ่ง



รูปที่ 4.2 แสดงฟังก์ชันของความต่างศักย์ในการมอดดูเลก ที่มีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดที่ศูนย์โวลต์

#### 4.2 การรับและการโพรเซสสัญญาณ (Detection and Processing)

การตรวจจับสัญญาณใช้เทคนิคการ ตรวจจับ (sensor) ทางแสง โดยที่จะต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์ทางแสง อิเล็กทรอนิกส์ การตรวจจับสัญญาณ และการนำสัญญาณไปวิเคราะห์ การตรวจจับสัญญาณนั้น โดยปกติใช้ตัวตรวจจับแสง สำหรับตรวจจับ (sensor) ชนิดต่าง ๆ คือเป็นโฟโตไดโอด เซมิคอนดักเตอร์และอวาแลนซ์ โฟโตไดโอด ชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับเหล่านี้เป็นตัวตรวจจับในระบบเซ็นเซอร์ สามารถใช้ตรวจจับความเข้มแสงสเปคตรัม หรืออาจจะเพิ่มอุปกรณ์ที่ช่วยทำให้การรับสัญญาณมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น เกรตติ้ง

การโพรเซสสัญญาณนั้น นำผลของการวัดที่ได้มาใช้ประโยชน์ โดยสัญญาณที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับการมอดคูเลต เมื่อพิจารณา สมการ  $\phi_B = \phi_B(t) \sin(\omega_B t)$   $\omega_B$  เป็นความถี่และ  $\phi(t)$  เป็นความต่างเฟสทางแสงระหว่างลำแสง โดย

$$\phi(t) = \phi_s + \phi_B \dots\dots\dots(4.7)$$

$\phi_s$  คือ static phase difference

$\phi_B$  คือ Amplitude ของเฟสที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการรบกวนสัญญาณเมื่อเขียนอยู่ในเทอมความเข้ม (I) จะได้

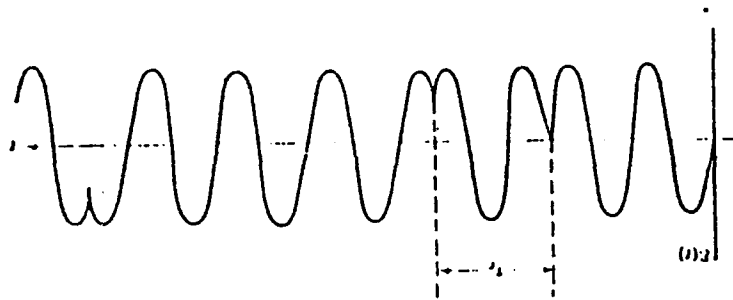
$$I = k[1 + A \cos(\phi_s(t) + \phi_B(t))] \dots\dots\dots(4.8)$$

### 4.3 การประยุกต์และการนำไปใช้งาน

ในทางปฏิบัติต้องการสังเกตลักษณะของเลเซอร์ที่ประพฤติเป็น sinusoidal oscillator ซึ่งมีเฟสที่สมบูรณ์ จะพบว่าสนามเลเซอร์จะมีค่า delay time ( $T_c$ ) เป็นศูนย์ รูปหนึ่งของสนามแสดงดังรูป 4.3 จะเห็นว่าสนามซึ่งเฟสที่สูญเสียไปจะเกิดขึ้นทุก ๆ  $T_c$  วินาที เพราะฉะนั้นทำให้ได้ความสัมพันธ์กับ delay time ( $T_c$ ) นี้ได้ว่า

$$T_c = 2(L_1 - L_2) / C \dots\dots\dots(4.9)$$

โดย C = ความเร็วแสง  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนเฟสในช่วง delay time

## บทที่ 5

### การศึกษาอุปกรณ์ทางแสงและการประยุกต์ (Photonic Device and Application)

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดส่วนต่าง ๆ ของการศึกษาอุปกรณ์ทางแสงและนำไปประยุกต์ใช้โดยอุปกรณ์หลักในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง ตัวกลางการส่งผ่านแสง ตัวตรวจจับ และมีคุณสมบัติเฉพาะตัวดังที่กล่าวมาแล้วในบทต้น ๆ นอกจากอุปกรณ์หลักดังกล่าวแล้วจะต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมในระบบคือ อุปกรณ์ยึดจับเส้นใยนำแสง อุปกรณ์รับแสง ซึ่งในแต่ละขั้นตอนนั้นจะกล่าวต่อไป

#### 5.1 อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง

ชุดอุปกรณ์ที่จัดไว้ในส่วนของแหล่งกำเนิดแสง ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงและส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้เลเซอร์ไดโอดทำงาน (วงจรขับ)

##### 5.1.1 แหล่งกำเนิดแสงมี 2 ชนิด

- แหล่งกำเนิดแสงชนิด แอลอีดี (LED) และ อินฟราเรด แอลอีดี (IRED)
- แหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ คือ เลเซอร์ไดโอด

##### แอลอีดี (LED)

แอลอีดี ที่นำมาใช้เป็นของบริษัท ฮิตาชิ (HITACHI) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเล็กดังรูปที่ 5.1ให้ความยาวคลื่นแสงอยู่ในช่วง 800-880 นาโนเมตร เป็นช่วงอินฟราเรด ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ นำมาใช้ในการศึกษาคูสมบัติของแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ดังกล่าวศึกษาได้จากภาคผนวก



รูปที่ 5.1 แสดงแอลอีดี

### เลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดที่นำมาใช้นี้เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท SHARP แสดงดังรูปที่ 5.2 นำมาใช้ 2 ชนิดคือ เลเซอร์ไดโอดชนิด Multimode เบอร์ LT023MDO และเบอร์ LT010MDO ทั้งสองชนิดนี้ให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 780 และ 810 นาโนเมตร ให้กำลังถึง 3 มิลลิวัตต์ นอกจากนี้ยังใช้เลเซอร์เบอร์ KD6701G ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 675 นาโนเมตร มีกำลัง 1 มิลลิวัตต์



รูปที่ 5.2 แสดงเลเซอร์ไดโอด

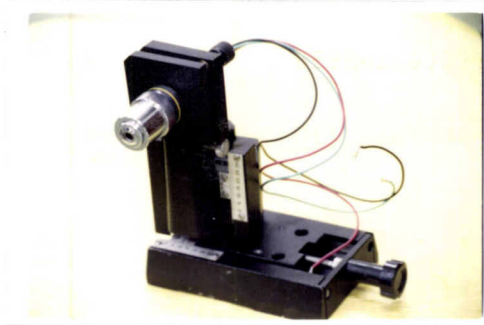
จากภาพจะเห็นได้ว่าเลเซอร์ไดโอดมีขนาดใหญ่กว่า แอลอีดี แต่ก็ให้กำลังสูงกว่า แต่ข้อจำกัดในการใช้เลเซอร์ไดโอดนี้คือ การที่อุปกรณ์ชนิดนี้มีความไวต่อประจุไฟฟ้าเป็นอย่างมาก เพราะฉะนั้นในการใช้เลเซอร์ไดโอดทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมต่อกับสายไฟหรือติดตั้งควรจะใช้แผ่นกันไฟฟ้าสถิตย์ (Rubber Mat) เพื่อป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์

เนื่องจากเลเซอร์ไดโอดนี้ให้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงใกล้อินฟราเรด หรือถือได้ว่าเป็นอินฟราเรดแล้วนั้น ทำให้ตาไม่สามารถมองเห็นลำแสงนั้นได้ จึงต้องใช้อุปกรณ์ช่วย คือ กล้องดูรังสีอินฟราเรด หรือใช้แผ่นฟอสเฟอร์ซึ่งมีราคาถูกกว่าก็ได้เป็นฉากรับแสงสำหรับรายละเอียดของเลเซอร์ไดโอดที่นำมาใช้นี้ได้กล่าวไว้อย่างละเอียดที่ภาคผนวก

ที่จะกล่าวถึงอีกอย่างหนึ่ง คือ อุปกรณ์ยึดจับเลเซอร์ไดโอด ซึ่งทำด้วยวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีลักษณะดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 เมื่อติดตั้งเลเซอร์ไดโอดแล้ว



รูปที่ 5.3 แสดงอุปกรณ์ติดตั้งเลเซอร์ไดโอด

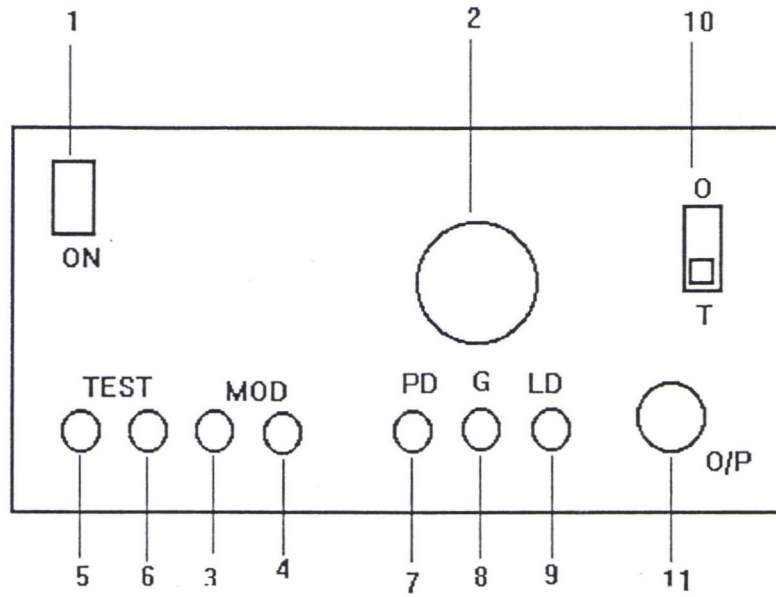


รูปที่ 5.4 แสดงภาพการติดตั้งเลเซอร์ไดโอด

### 5.1.2 วงจรขับ (Driver Circuit)

วงจรขับที่ทำให้เลเซอร์ไดโอดทำงานได้นั้นจะต้องมีเสถียรภาพในการรักษากระแสให้คงที่เป็นอย่างมาก เนื่องจากคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอดนั้น เมื่อกระแสเปลี่ยนไปทำให้ความยาวคลื่นที่ให้ออกมานั้นเปลี่ยนไปด้วย ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว จากวงจรที่แสดงดังรูปที่ 5.5 นั้นเป็นวงจรที่ได้ถูกออกแบบมา เพื่อให้สามารถผสมสัญญาณ (modulation) เข้าไปเพื่อส่งข้อมูลไปตามเส้นใยนำแสงได้





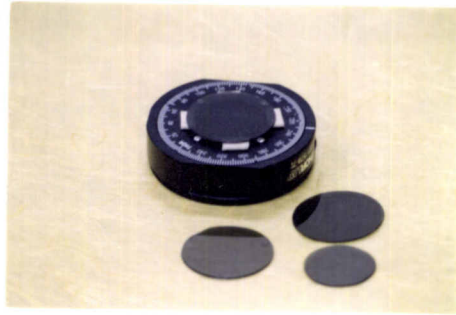
รูปที่ 5.7 แสดงหน้าที่และฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ขับเลเซอร์ไดโอด

ส่วนหน้าที่การทำงานและฟังก์ชันต่าง ๆ ของเครื่องนี้อธิบายได้ดังนี้ คือ

- หมายเลข 1 เป็นสวิตช์ ปิด-เปิด
- หมายเลข 2 เป็นส่วนปรับค่ากระแส
- หมายเลข 3 สัญญาณจากแหล่งกำเนิดความถี่เพื่อประโยชน์ในการมอดดูเลชั่น
- หมายเลข 4 ซากราวต์ของสัญญาณจากแหล่งกำเนิดความถี่
- หมายเลข 5 สัญญาณใช้ทดสอบก่อนที่จะส่งเข้าสู่เลเซอร์ไดโอด (ขณะที่ใช้โหมดนี้ หมายเลข 10 จะต้องสวิตช์ที่ T) ต่อกับ Oscilloscope
- หมายเลข 6 ซากราวต์ของหมายเลข 5
- หมายเลข 7 เลเซอร์ไดโอด
- หมายเลข 8 ซากราวต์ของเลเซอร์ไดโอด
- หมายเลข 9 อุปกรณ์รับแสงที่อยู่ในตัวเลเซอร์ไดโอด
- หมายเลข 10 สวิตช์เลือกเพื่อใช้ทดสอบสัญญาณก่อนป้อนเข้าสู่เลเซอร์ไดโอด เมื่อต้องการส่งออกทางเลเซอร์ไดโอดให้สวิตช์ไปที่ 0
- หมายเลข 11 สัญญาณที่ใช้สังเกตขณะที่เลเซอร์ไดโอดทำงาน

## 5.2 โพลาริเซชัน

แผ่นโพลาริเซชัน หรือ โพลาริเซชันที่ใช้ในโครงการนี้ เป็นโพลาริเซชันเชิงเส้น (Linear Polarization) สำหรับบังคับหรือกำหนดให้โพลาริเซชันของลำเลเซอร์ที่เข้าสู่เส้นใยนำแสงนั้นมีแกนโพลาริเซชันเพียงแกนเดียว ทำหน้าที่เป็นตัวลดทอนความเข้มแสงเพื่อใช้ทดสอบในการวัดคุณสมบัติของตัวตรวจจับแสง ว่ามีความสามารถในการรับแสงได้ดีเพียงใด แสดงดังรูปที่ 5.8



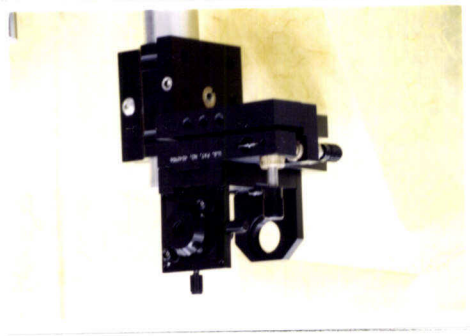
รูปที่ 5.8 แสดงลักษณะแผ่นโพลาริเซชัน

## 5.3 อุปกรณ์ยึดจับเส้นใยนำแสง

อุปกรณ์ที่อยู่ในชุดยึดจับด้วยเส้นใยนำแสงนั้นประกอบด้วย เลนส์และแป้นยึดจับเส้นใยนำแสง เลนส์ที่ใช้เป็นเลนส์รวมแสงของกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้เป็นเลนส์วัตถุ ดังรูปที่ 5.10 แป้นยึดจับเส้นใยนำแสงนั้น มีลักษณะเป็นแป้นสี่เหลี่ยมมีรูด้านล่างเพื่อยึดสกรู เป็นแบบที่สามารถปรับได้ 2 มิติ แสดงดังรูปที่ 5.10



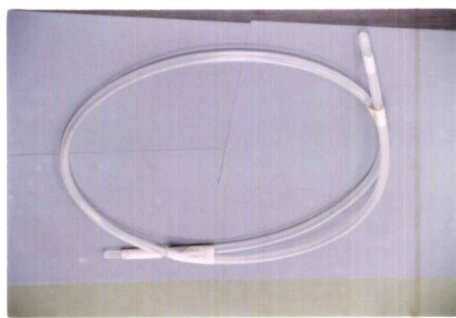
รูปที่ 5.9 แสดงเลนส์รวมแสง



รูปที่ 5.10 แสดงแป้นยึดจับแบบปรับได้ 2 มิติ

#### 5.4 เส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงที่นำมาใช้ในโครงการนี้เป็นเส้นใยนำแสงชนิด พลาสติก (Plastic) ซึ่งสามารถส่งผ่านแสงและรับแสงที่สะท้อนกลับได้ดี เพราะมีขนาดใหญ่ปัญหาในการส่งแสงเข้าเส้นใยนำแสงจึงลดน้อยลง ส่วนคุณสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยนำแสงได้กล่าวมาแล้วในบทข้างต้น



รูปที่ 5.11 แสดงเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก

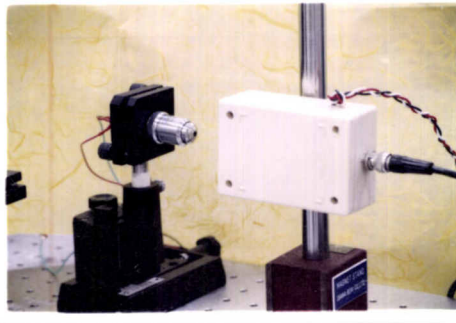
#### 5.5 ชุดอุปกรณ์รับแสงและประมวลสัญญาณ

ชุดอุปกรณ์รับแสงและการประมวลสัญญาณ ประกอบด้วยส่วนใหญ่ ๆ 4 ส่วนด้วยกันคือ

1. อุปกรณ์ในการรวมแสงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับแสง (Detector)
2. อุปกรณ์ตรวจจับแสง
3. อุปกรณ์สะท้อนสัญญาณ
4. เครื่องกำเนิดสัญญาณแบบดิจิทัล และออสซิลโลสโคป

### 5.5.1 อุปกรณ์ในการรวมแสงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับแสง

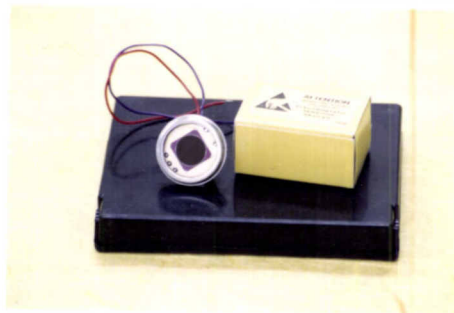
แสงที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดนั้น แผ่กว้างออกไปทุกทิศทางไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ต้องใช้เลนส์ในการรวมแสง เพื่อลดการกระเจิงของแสง โดยจุดโฟกัสตกกระทบบนหน้าตัวตรวจจับแสงพอดี ทำให้ได้ค่าความเข้มสูงสุด แสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แสดงการวางอุปกรณ์เพื่อนำแสงเข้าสู่อุปกรณ์นำแสง

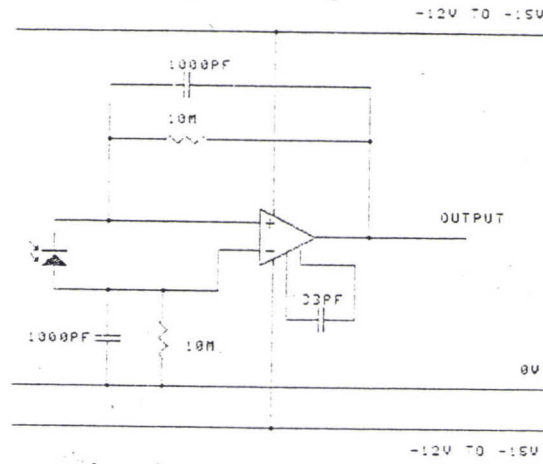
### 5.5.2 อุปกรณ์ตรวจจับแสง (Detector)

อุปกรณ์ตรวจจับแสงนี้ใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงของบริษัท RS รุ่น BPX 65 เป็นชนิดพีไอเอ็น (PIN) มีลักษณะคล้าย แอลอีดี (LED) แต่มีตัวถังเป็นโลหะ ลักษณะของตัวถังเป็นแบบ TO-18 ตอบสนองที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร และตอบสนองที่ความถี่สูงได้ดี นอกจากนี้ยังใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสง Large Area 100 mm<sup>2</sup> ชนิดเดียวกันแต่มีพื้นที่ผิวรับแสงมากถึง 100 ตารางมิลลิเมตร ตอบสนองที่ความถี่ 900 นาโนเมตร และยังใช้ รุ่น OSD 3(B1)-5T 1U ประกอบกันในโครงงานนี้อีกด้วย ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ กล่าวไว้ในภาคผนวกแล้ว

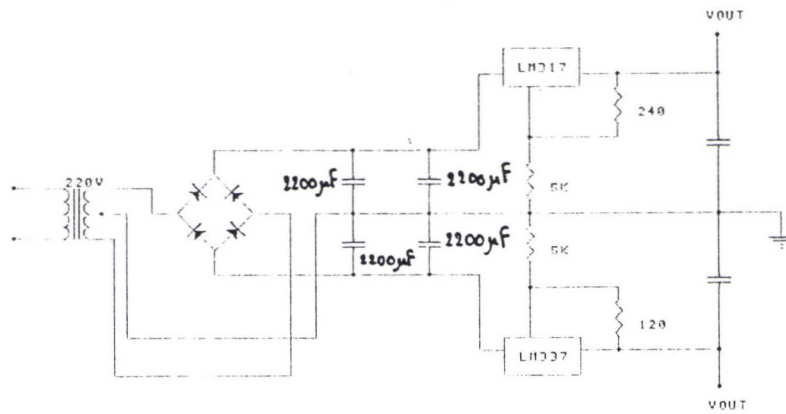


รูปที่ 5.13 แสดงอุปกรณ์รับแสง

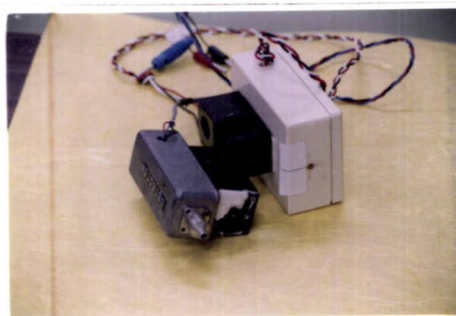
สำหรับวงจรขั้วนั้นประกอบด้วย ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเพียง 1 ถึง 2 ตัว เท่านั้น หรือเพิ่มเติมในส่วนของวงจรขยายสัญญาณไปด้วยก็ได้ วงจรนี้ใช้ไฟกระแสตรงทั้งบวกและลบ 12 โวลต์ เป็นไฟเลี้ยงในวงจร ดังรูปที่ 5.14 และ 5.15



รูปที่ 5.14 แสดงวงจรขั้วอุปกรณ์รับแสง



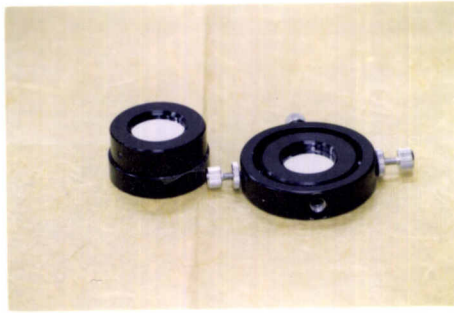
รูปที่ 5.15 แสดงวงจรจ่ายไฟกระแสตรง บวกและลบ 12 โวลต์



รูปที่ 5.16 แสดงอุปกรณ์รับแสงรวมกับวงจรในชุดเดียวกัน

### 5.5.3 อุปกรณ์สะท้อนสัญญาณ

ในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง ไปสู่ปลายทางอีกด้านหนึ่งและให้สะท้อนสัญญาณกลับนั้น จะใช้กระจกเป็นตัวสะท้อนสัญญาณที่มอดดูเลทไปพร้อม ๆ กับแสงเลเซอร์ ซึ่งปรับได้ 2 มิติ แสดงดังรูป 5.17



รูปที่ 5.17 แสดงลักษณะกระจกสะท้อนแสง

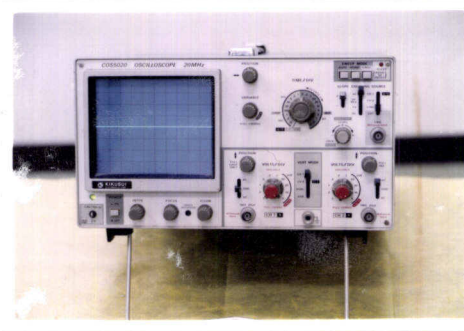
### 5.5.4 แหล่งกำเนิดสัญญาณแบบดิจิทัลและออสซิลโลสโคป

ใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณแบบดิจิทัลในการมอดดูเลทไปพร้อมๆกับแสงเลเซอร์ เพื่อดูการสะท้อนกลับของสัญญาณ ซึ่งป้อนความถี่ในระดับที่ต้องการได้อย่างเหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 แสดงแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบดิจิทัล

เมื่อได้ทำปฏิบัติการต่าง ๆ นั้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จดบันทึก ตลอดจน  
สังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคือ อุปกรณ์ที่เรียกว่า ออสซิลโลสโคป แสดง  
ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 แสดงภาพออสซิลโลสโคป

ที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นการแนะนำอุปกรณ์ทั้งหมด ที่จะใช้ในการปฏิบัติการต่อไปนี้  
และอธิบายถึงระบบการวัด ที่นำอุปกรณ์ทุกชิ้นมารวมกัน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ตามวัตถุประสงค์  
ประสงค์ต่อไป

**ปฏิบัติการที่ 1** การศึกษาคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ

- วัตถุประสงค์**
1. เพื่อศึกษาความเข้มแสงในรูปความต่างศักย์
  2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์

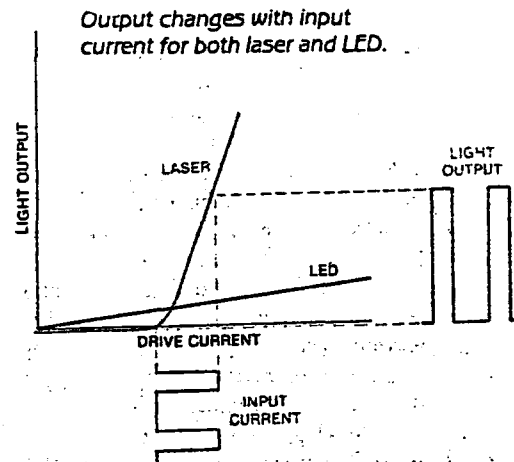
**วัสดุอุปกรณ์**

1. ชุดรับเลเซอร์ไดโอด
2. แอลอีดี เลเซอร์ไดโอด ชนิดต่าง ๆ
3. เลนส์รวมแสง 1 ชิ้น
4. อุปกรณ์ยึดจับ แอลอีดี และเลเซอร์ไดโอด
5. อุปกรณ์รับแสง
6. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง  $\pm 12$  โวลต์
7. ออสซิลโลสโคป

**หลักการ และเหตุผล**

การวัดความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงอยู่ในรูปของความต่างศักย์ โดยความต่างศักย์ที่วัดได้ต้องไม่เกิน ค่าที่ใช้ไบอัสให้กับอุปกรณ์รับแสง ซึ่งในปฏิบัติการนี้ใช้แรงดันที่ 12 โวลต์ ในการวัดความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสง จะให้ลำแสงที่โฟกัสจากเลนส์ของแหล่งกำเนิดแสง ตกกระทบบนพื้นผิวของอุปกรณ์รับแสง (Detector) โดยตรง ไม่ผ่านเส้นใยนำแสง เพื่อเป็นการลดอัตราการสูญเสียแสงที่จุดเชื่อมต่อต่าง ๆ การปรับอุปกรณ์รับแสงควรให้ตั้งฉาก และอยู่กึ่งกลางกับแสงที่มาตกกระทบบนเพื่อรับความเข้มแสงได้มากที่สุด

หลังจากปรับชุดอุปกรณ์ให้สามารถวัดความเข้มแสงได้สูงสุดแล้ว จึงทำการเปลี่ยนกระแส ที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดแสง เพื่อดูคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดแสง สังเกตและบันทึกผลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับกระแส



รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด และแอลอีดี

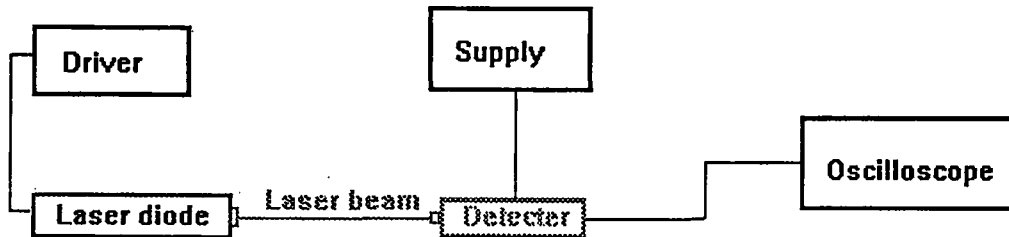
จากรูป 5.20 เป็นกราฟที่แสดงถึงการเปรียบเทียบของแหล่งกำเนิดแสง เลเซอร์ ไดโอด กับ แอลอีดี เมื่อดูจากกราฟจากช่วงที่กระแสมีค่าสูงถึงจุดเทรชโฮลด์ (Threshold) ทั้งแอลอีดี และเลเซอร์ไดโอด จะมีการเปล่งแสงอย่างไม่มีระเบียบ มีความเข้มแสงต่ำ เมื่อเพิ่มค่ากระแสต่อไปอีกเลเซอร์ไดโอดจะเกิดการป้อนกลับทำให้แสดงคุณสมบัติการเป็นเลเซอร์ออกมา ซึ่งแตกต่างจากแอลอีดีอย่างเห็นได้ชัด เป็นส่วนที่สามารถนำคุณสมบัตินี้ไปใช้ในงานด้านการสื่อสาร และด้านอื่น ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ

#### ข้อควรระวัง

ควรเพิ่มกระแสให้กับเลเซอร์ไดโอดอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเสียหายอันเนื่องมาจากการเพิ่มกระแสอย่างรวดเร็ว

## วิธีการปฏิบัติการ

### 1) จัดอุปกรณ์ดังรูป



รูปที่ 5.21 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในปฏิบัติการที่ 1

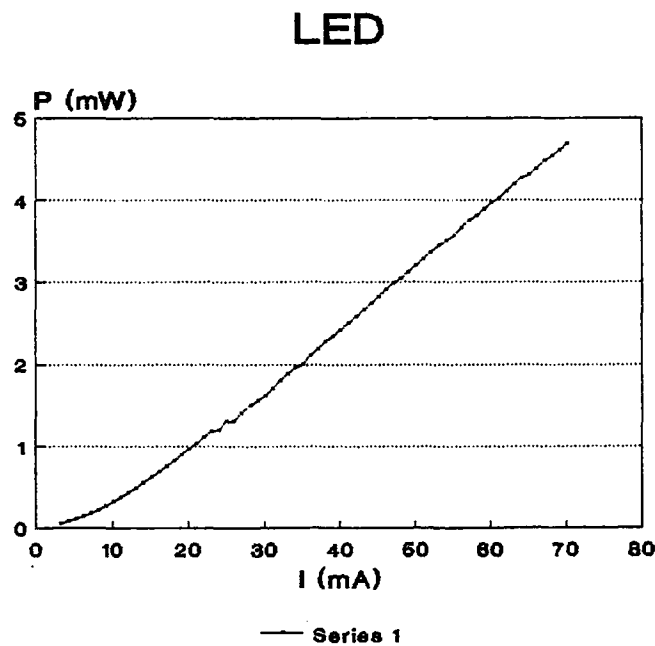
- 2) ปรับกระแสที่ขั้วเลเซอร์ไดโอด ตามข้อมูลเฉพาะของเลเซอร์ไดโอดชนิดนั้น ๆ โดยให้ค่ากระแสมีค่าเท่ากับกระแส เทรดโฮลด์ (Threshold)
- 3) ปรับเลนส์ให้ลำแสงไฟกัสตกกระทบบนผิวอุปกรณ์รับแสงพอดี
- 4) จ่ายไฟให้แก่อุปกรณ์รับแสง โดยใช้ไฟกระแสตรงด้านบวกและลบ 12 โวลต์ และต่อขั้ว BNC เข้ากับออสซิลโลสโคป เพื่อบันทึกผล
- 5) ปรับระบบการวัด ให้ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าสูงสุด คือประมาณ 12 โวลต์ หรือมีค่าใกล้เคียงที่สุด
- 6) เปลี่ยนค่ากระแสที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดจากน้อยไปมาก สังเกตและบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์
- 7) เมื่อได้ความต่างศักย์คงที่ประมาณ 2-3 ค่า ให้หยุดการเพิ่มกระแสเพื่อป้องกันเลเซอร์ไดโอดเสียหาย

8) ทำเหมือนกันกับข้อ 1 ถึง 7 เพียงแต่เปลี่ยนชนิดของแหล่งกำเนิดแสง เป็น แอล อี ดี และ เลเซอร์ไดโอดชนิดอื่น ๆ

9) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ โดยให้แกนนอนเป็นค่ากระแส แกนตั้งเป็นค่าความต่างศักย์

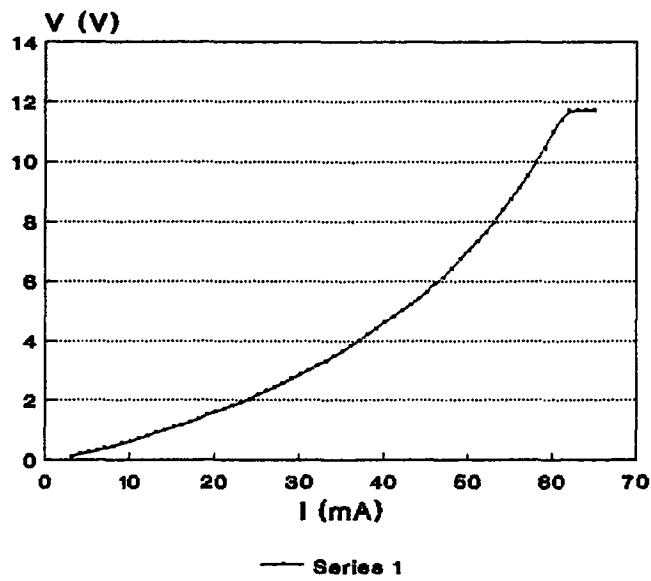
### ผลการปฏิบัติการ

ความเข้มแสงที่วัดในรูปของความต่างศักย์ วัดค่าในขณะที่ได้ค่าความต่างศักย์สูงสุด มีค่าประมาณ 11.8 โวลต์ และ เมื่อทำการทดลองโดยปรับกระแสเพื่อศึกษาคุณสมบัติของ แหล่งกำเนิดแสงนั้น ได้ผลการทดลองแสดงดังกราฟ

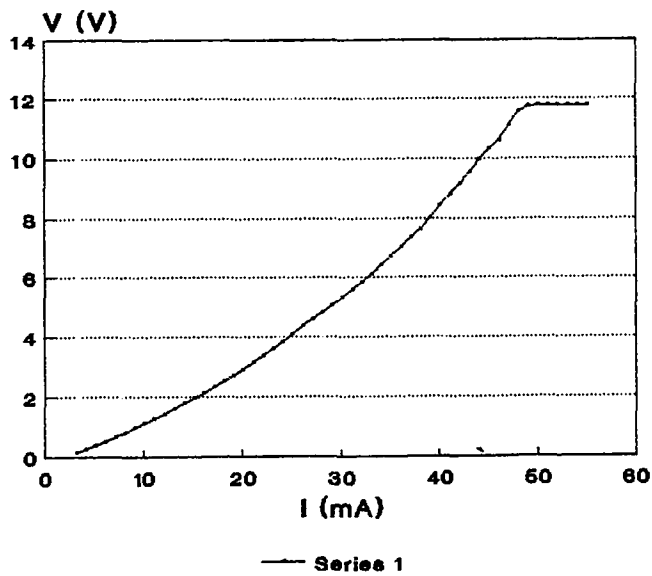


รูปที่ 5.22 กราฟแสดงผลคุณสมบัติของ แอล อี ดี ที่ใช้ในปฏิบัติการที่ 1

### Laser Diode KD 6701 G



### Laser Diode LT 023 MDO



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงผลคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด ที่ใช้ในปฏิบัติการที่ 1

**สรุปผลการทดลอง**

เมื่อดูจากกราฟที่ได้จากผลการปฏิบัติการ เลเซอร์ไดโอดจะคุณสมบัติที่เหมือนกับ แอล อี ดี ในช่วงที่กระแสเพิ่มจากศูนย์จนถึงจุดเทอร์ตไรลด์ แต่เมื่อเพิ่มกระแสต่อไปอีก เลเซอร์ไดโอด จะมีคุณสมบัติในการเป็นเลเซอร์ต่างจาก แอล อี ดี ที่ยังคงมีคุณสมบัติในการเปล่งแสงเหมือนเดิม ส่วนค่าความต่างศักย์สูงสุดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียง 12 โวลต์ เป็นปรากฏการณ์เกิดการอิ่มตัว (Saturated) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ

**ปฏิบัติการที่ 2** การศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสง

**วัตถุประสงค์** เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแสงของความสัมพันธ์ระหว่างจุดต่าง ๆ บนพื้นที่รับแสง กับ ความต่างศักย์

- วัสดุอุปกรณ์**
1. ชุดขับเลเซอร์ไดโอด
  2. เลเซอร์ไดโอด
  3. เลนส์รวมแสง 1 ชิ้น
  4. แผ่นโพลารอยด์
  5. อุปกรณ์ยึดจับเลเซอร์ไดโอด
  6. อุปกรณ์รับแสง
  7. อุปกรณ์ยึดจับตัวรับแสง
  8. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง  $\pm 12$  โวลต์
  9. ออสซิลโลสโคป

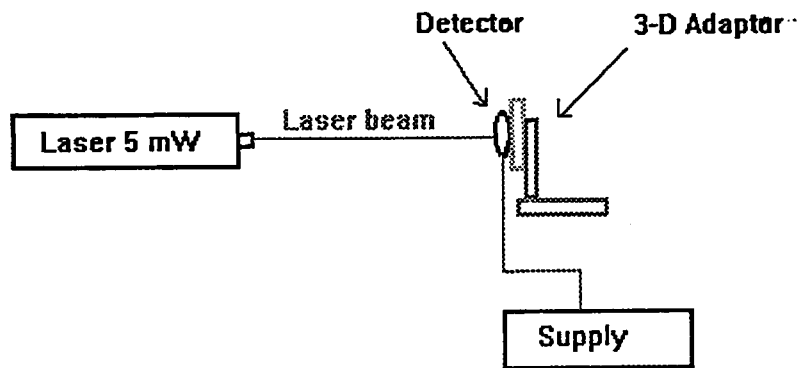
#### **หลักการและเหตุผล**

เมื่อแสงตกกระทบบนผิวของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นตัวรับแสง ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงาน เกิดอิเล็กตรอนและโฮลซึ่งสัมพันธ์กับความต่างศักย์ด้านเอาก์พุทที่ได้ออกมาจุดต่าง ๆ บนพื้นที่รับแสงเมื่อมีแสงมาตกกระทบบจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าไม่เท่ากัน ดังนั้น ความสามารถในการรับแสงที่จุดต่าง ๆ บนพื้นที่รับแสงของสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นอุปกรณ์รับแสงจะไม่เท่ากัน และการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเกิดได้ดีที่สุด เมื่อแสงตกกระทบบตรงกึ่งกลางพอดี ซึ่งก็คือความสามารถในการรับแสงได้ดีที่สุดนั่นเอง

ในการวัดความสามารถในการรับแสง แสงที่ตกกระทบบตัวรับแสงควรมีค่าความเข้มแสงต่ำเพื่อให้เห็นความแตกต่างทางด้านเอาก์พุทของความต่างศักย์ได้อย่างชัดเจน และนำมาเขียนกราฟได้

## วิธีการปฏิบัติการ

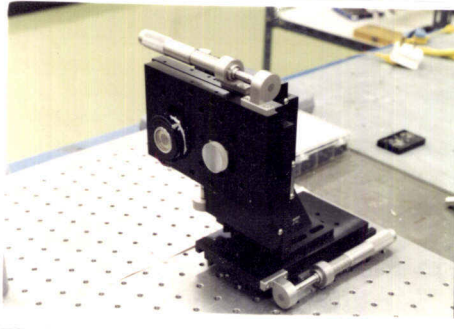
### 1. จัดอุปกรณ์ดังรูป



รูปที่ 5.24 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในปฏิบัติการที่ 2

2. ปรับกระแสที่ขั้วเลเซอร์ไดโอด ตามข้อมูลเฉพาะของเลเซอร์ไดโอดชนิดต่าง ๆ โดยใช้กระแสมีค่าเท่ากับกระแสเทรชโวลด์ (Threshold)
3. ปรับแผ่นโพลารอยซ์ที่วางกันแสงทั้ง 2 ชั้น เพื่อให้ได้แสงที่มีความเข้มต่ำสุด
4. ปรับเลนส์ให้ลำแสงโฟกัสตกกระทบบนผิวอุปกรณ์รับแสงพอดี
5. จ่ายไฟให้แก่อุปกรณ์รับแสง โดยใช้ไฟกระแสตรงด้านบวกและลบ 12 โวลต์ และต่อขั้ว BNC เข้ากับออสซิลโลสโคปเพื่อบันทึกผล
6. ปรับตัวรับแสงที่ติดติดกับแท่นปรับระดับ 3 มิติ ให้แสงโฟกัสตกกระทบบนตรงมุมใดมุมหนึ่งของตัวรับแสง บันทึกค่าระยะแกนนอน ( $x_0$ ) และระยะแกนตั้ง ( $y_0$ )
7. บันทึกผลความต่างศักย์ที่วัดได้
8. เพิ่มระยะทางในแนวแกนนอนครั้งละ 0.1 มิลลิเมตร บันทึกผลแต่ละครั้งจนไม่สามารถวัดค่าได้
9. เพิ่มระยะทางในแนวแกนตั้งครั้งละ 0.1 มิลลิเมตร ทำการทดลองเหมือนข้อ 7

10. เพิ่มระยะทางในแนวแกนตั้งจนไม่สามารถวัดค่าความต่างศักย์ได้ บันทึกผล
11. นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟ ในรูปความสัมพันธ์ของจุดต่าง ๆ บนพื้นผิวตัวรับแสงกับความต่างศักย์ที่วัดได้



รูปที่ 5.25 แสดงแท่นปรับระดับ 3 มิติ

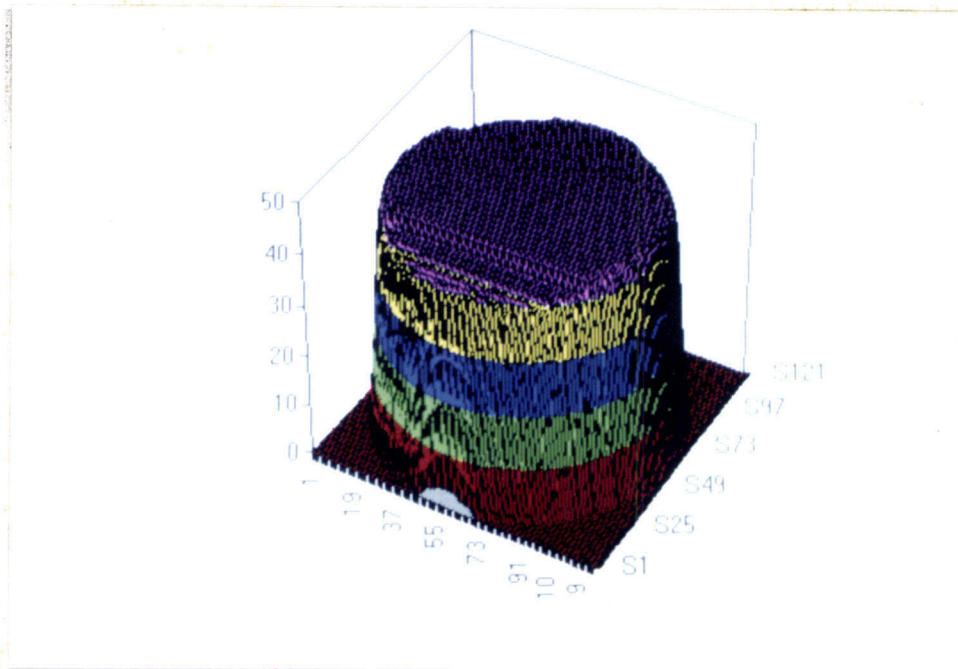
#### ข้อเสนอแนะ

อุปกรณ์รับแสงที่ใช้ในการปฏิบัติการนี้มีพื้นที่รับแสง 100 ตารางมิลลิเมตร และเป็นอุปกรณ์ที่ไวต่อแสงมาก ควรทำการทดลองในบริเวณที่มีดสนิทเพื่อไม่ให้แสงจากสิ่งแวดล้อมเข้ามารบกวนในระบบได้

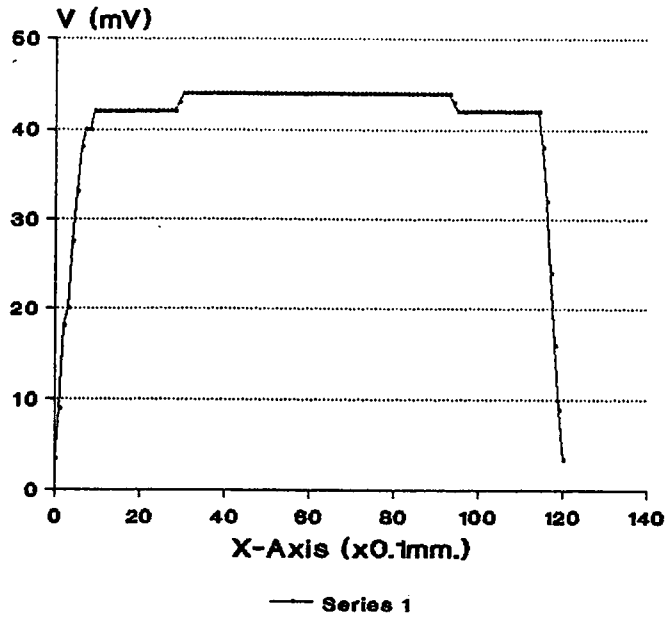
ควรระวังกระจกที่ติดอยู่ที่ผิวหน้าอุปกรณ์รับแสงไม่ให้เกิดรอยขีดข่วนหรือรอยนิ้วมืออื่นเนื่องมาจากการสัมผัส เพราะทำให้เกิดปัญหาในการรับแสงได้ไม่ดี นอกจากนี้ควรระวังเกี่ยวกับตัวถังอุปกรณ์รับแสงซึ่งไวต่อประจุไฟฟ้า อาจทำให้เสียหายได้

**ผลการปฏิบัติการ**

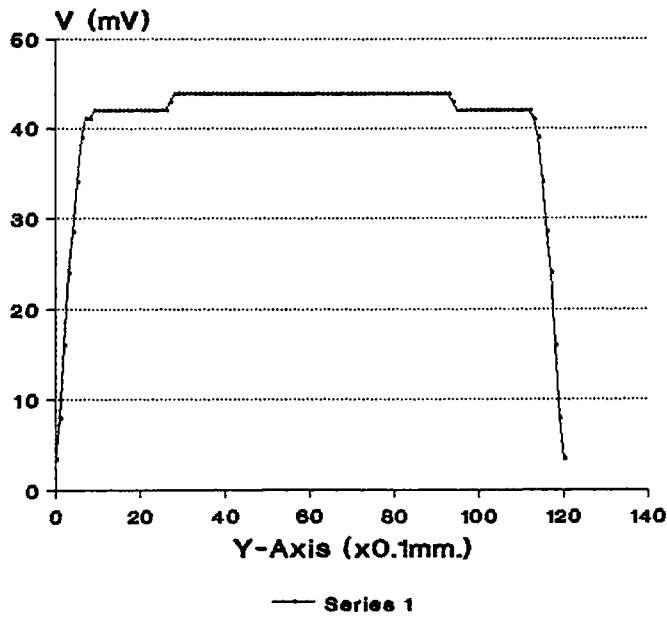
ค่าความเข้มแสงสูงสุดในรูปของความต่างศักย์ ขณะที่วัดได้จากอุปกรณ์รับแสงมีค่าประมาณ 47 มิลลิโวลต์ และความสัมพันธ์ระหว่างจุดต่าง ๆ บนพื้นผิวของตัวรับแสงกับความต่างศักย์แสดงในรูปกราฟ 3 มิติ ดังรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 แสดงผลในปฏิบัติการที่ 2



(a)



(b)

รูปที่ 5.27 แสดงความสามารถในการรับแสงที่จุดต่าง ๆ บนอุปกรณ์รับแสงในแนวเส้นผ่านจุดศูนย์กลาง a) ในแนวแกน x b) ในแนวแกน y

### สรุปผลการปฏิบัติการ

จากกราฟผลการปฏิบัติการ ความสามารถในการรับแสงที่จุดต่าง ๆ กันบนพื้นผิวตัวรับแสงมีค่าไม่เท่ากัน โดยบริเวณรอบนอกจะมีความสามารถในการรับแสงได้ไม่ดีเหมือนกับบริเวณจุดกึ่งกลางของตัวรับแสง ดังนั้นในการนำไปใช้งานควรปรับแสงให้ตกกระทบบตรงจุดกึ่งกลางของตัวรับแสงเพื่อให้เกิดการสูญเสียทางแสงน้อยที่สุด และเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการรับแสง

**ปฏิบัติการที่ 3** การประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารเส้นใยนำแสง

**วัตถุประสงค์** นำความรู้เกี่ยวกับแหล่งกำเนิดแสง เส้นใยนำแสง และอุปกรณ์รับส่ง มาประยุกต์ใช้งานได้

- วัสดุอุปกรณ์**
1. ชุดขับเลเซอร์ไดโอด
  2. เลเซอร์ไดโอด
  3. อุปกรณ์ยึดจับเลเซอร์ไดโอด
  4. อุปกรณ์รับแสง
  5. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง  $\pm$  12 โวลต์
  6. เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก
  7. ผลึกแอกล่าแสง
  8. กระจกสะท้อนแสง
  9. แหล่งกำเนิดสัญญาณแบบดิจิทัล
  10. ออสซิลโลสโคป

#### **หลักการและเหตุผล**

เมื่อได้ทำการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดแสงอุปกรณ์รับแสงแล้ว ในปฏิบัติการนี้จะกล่าวถึง การนำไปประยุกต์ใช้งานโดยใช้หลักการ การป้อนกลับของสัญญาณ แสงเลเซอร์ซึ่งเป็นตัวพาหะถูกมอดูเลตไปพร้อม ๆ กับสัญญาณดิจิทัลในชุดขับเลเซอร์ไดโอด ผ่านเส้นใยนำแสง ไปตกกระทบบนวัตถุที่สะท้อนแสง คือกระจก มีผลทำให้เกิดสัญญาณป้อนกลับเข้าไปในเส้นใยนำแสงแล้วตกกระทบบนที่อุปกรณ์รับแสง โดยมีผลึกแอกล่าแสงเป็นตัวช่วยในการแยกแอกล่าแสง

จากหลักการดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ในระบบการสื่อสารได้ อาทิเช่น ออกแบบเป็นรหัสสัญญาณป้อนกลับ (laser feedback) เป็นต้น

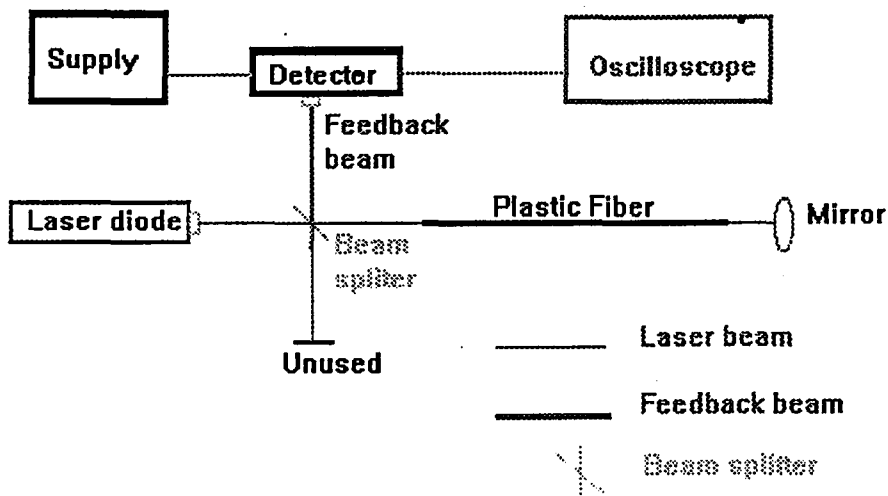
เส้นใยนำแสงที่ใช้ในปฏิบัติการนี้เป็นชนิดพลาสติก เนื่องจากมีขนาดใหญ่ ง่ายต่อการส่งผ่านแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงแล้วเกิดการป้อนกลับของสัญญาณ

### ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเส้นใยนำแสงเป็นชนิดพลาสติกมีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ ควรขีดพื้นที่หน้าตัดที่รับแสงให้เรียบและตั้งฉาก และปรับแต่งระบบให้ดีที่สุดเพื่อที่จะทำให้เกิดการสูญเสียของแสงที่จุดต่าง ๆ น้อยลง

### วิธีการปฏิบัติการ

#### 1. จัดอุปกรณ์ดังรูป

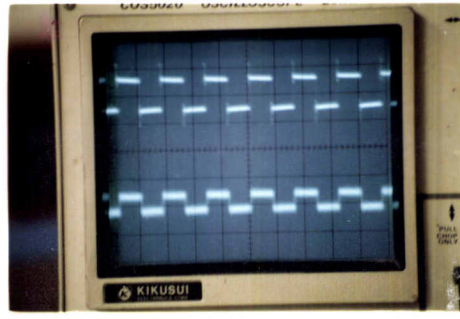


รูปที่ 5.28 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการปฏิบัติการที่ 3

2. ปรับกระแสที่ขับเลเซอร์ไดโอดตามข้อมูลเฉพาะของเลเซอร์ไดโอด โดยให้ค่ากระแสมีค่าเท่ากับกระแสเทรชโฮลด์ (Threshold)
3. มอดดูเลตสัญญาณขนาดความถี่ 500 เฮิร์ต เข้ากับชุดขับเลเซอร์ไดโอด
4. ปรับระบบที่จุดต่าง ๆ เพื่อให้ได้สัญญาณป้อนกลับทางด้านเอาต์พุตที่อุปกรณ์รับแสงมีค่าชัดเจนที่สุด
5. บันทึกผลของสัญญาณที่ได้

### ผลการปฏิบัติการ

สัญญาณป้อนกลับที่รับได้จากอุปกรณ์รับแสงแสดงดังรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.29 แสดงสัญญาณที่มอดดูเลต (บน) และ สัญญาณป้อนกลับ (ล่าง)

### สรุปผลการทดลอง

ในปฏิบัติการนี้ สัญญาณป้อนกลับทางด้านเอาต์พุตจากอุปกรณ์รับแสงมีเฟสตรงกันข้ามกับสัญญาณที่มอดดูเลตไปพร้อม ๆ กับแสงเลเซอร์ไดโอด แต่แรงดันของสัญญาณมีค่าลดต่ำลง อันเนื่องมาจากการสูญเสียทางแสงและการมอดดูเลตสัญญาณในวงจรมอดดูเลต ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการปรับระบบต่าง ๆ ทางแสงให้มีการสูญเสียน้อยที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

1. Amnon Yariv, Optical Electronics, 4 th ed., Saunders College Publishing, a division of Holt, Rinehart and Winston, Inc, 1991.
2. Antony Vanderlugt, Optical Signal Processing, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.
3. Gerd Keiser, Optical Fiber Communications, 2 Th ed., McGraw-Hill international Book Company, 1988.
4. Jeff Hecht, Understanding Fiber Optic, Howard W. Sams & Company, U.S.A., 1987.
5. John M. Senior, Optical Fiber Communication, 2 nd ed., Perntice Hall, Inc 1992.
6. K. Petermann, Laser Diode Modulation and Noise, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.
7. Yanong Ning, K.T.V Grattan, B.T. Meggit, and A.W. Palmer, "Characteristic of laser diode for interferometric use" Applied Optics "Vol.28, No.17, 1989.
8. อภินันท์ มณีฮานนท์, ทฤษฎีสื่อสารเส้นใยนำแสง, พิมพ์ครั้งที่ 2, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2534.