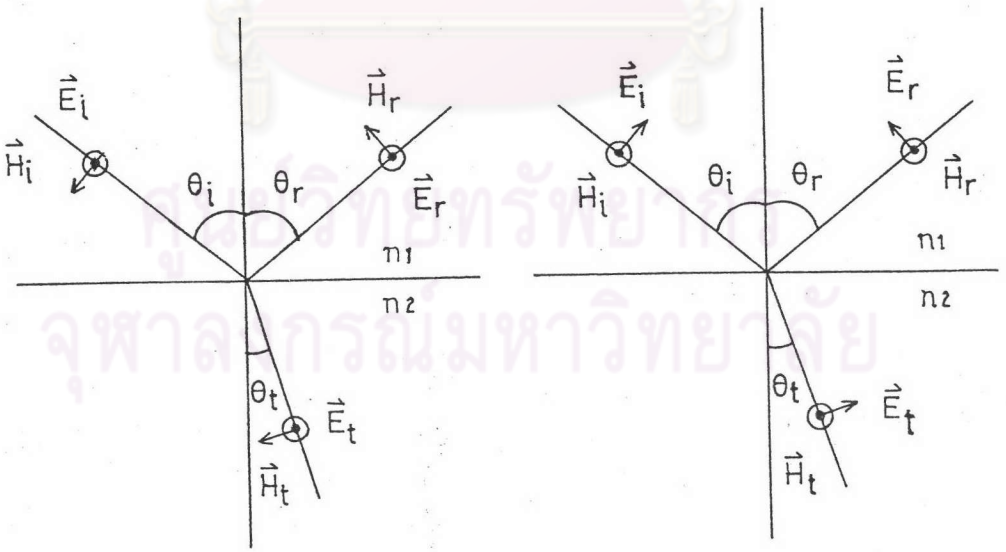
บทที่ 2

คุณสมบัติของเส้นใยแสงและหลักการที่ใช้วัดตำแหน่งสายขาดของเส้นใยแสง

2.1 การส่งผ่านของแสงบริเวณขอบเขตระหว่างตัวกลางที่ต่างกัน

เมื่อแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านจากตัวกลางหนึ่งเข้ากระทบผิวขอบเขตระหว่างตัวกลางนั้นกับอีกตัวกลางหนึ่ง โดยทั่วไปผลที่ได้คือ กำลังของคลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ และอีกส่วนหนึ่งจะส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สอง การสะท้อนกลับและการส่งผ่านของคลื่นนี้จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตทางแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือส่วนประกอบในแนวสัมผัสของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะต้องต่อเนื่อง และฟลักซ์ในแนวตั้งฉากของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะต้องต่อเนื่องเช่นเดียวกัน และเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณาอยู่นี้เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นเงื่อนไขที่ว่าสนามต้องต่อเนื่องตรงผิวขอบเขตนั้น จึงบังคับทั้งขนาดและเฟสของคลื่น รูปที่ 2.1 แสดงระนาบที่ทำการคิดเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งโดยทั่วไปจะพิจารณาในระนาบสองแบบด้วยกันคือ ระนาบที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า (perpendicular polarization) กับระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้า (parallel polarization) ในระนาบทั้งสองนี้คุณสมบัติในการสะท้อนและในการส่งผ่านคลื่นจะไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปถ้าให้ E_i, E_r, E_t เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่านตามลำดับ ในกรณีของ



(ก) ระนาบที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้า

รูปที่ 2.1 ระนาบที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าและระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้า

ระนาบตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าจะได้อัตราการสะท้อนกลับ $\Gamma_{\perp}$ (Reflection coefficient) และอัตราการส่งผ่าน $\tau_{\perp}$ (Transmission coefficient) ในรูปต่อไปนี้ [7]

$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \cos\theta_1 - \eta_1 \cos\theta_2}{\eta_2 \cos\theta_1 + \eta_1 \cos\theta_2} \qquad (2.1)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2\eta_2 \cos\theta_1}{\eta_2 \cos\theta_1 + \eta_1 \cos\theta_2} \qquad (2.2)$$

ในขณะที่ $\eta_1 = \sqrt{\mu_o/\epsilon_1} = \sqrt{\mu_o/(n_1^2 \epsilon_o)}$ และ $\eta_2 = \sqrt{\mu_o/(n_2^2 \epsilon_o)}$ ในทำนองเดียวกัน ในกรณีของระนาบขนานกับสนามไฟฟ้า จะได้อัตราการสะท้อนกลับ $\Gamma_{//}$ และอัตราการส่งผ่าน $\tau_{//}$

$$\Gamma_{//} = \frac{\eta_1 \cos\theta_1 - \eta_2 \cos\theta_2}{\eta_1 \cos\theta_1 + \eta_2 \cos\theta_2} \qquad (2.3)$$

$$\tau_{//} = \frac{2\eta_2 \cos\theta_1}{\eta_1 \cos\theta_1 + \eta_2 \cos\theta_2} \qquad (2.4)$$

และเนื่องจากอัตราการสะท้อนกลับของกำลังคลื่น R และอัตราการส่งผ่านของกำลังคลื่น T จะเท่ากับกำลังสองของค่าสัมบูรณ์ของ Γ และ τ ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ $R_{\perp}$, $T_{\perp}$ และ $R_{//}$, $T_{//}$ ดังในสมการต่อไปนี้

$$R_{\perp} = \frac{\left|n_1 \cos\theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_1}\right|^2}{\left|n_1 \cos\theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_1}\right|^2} \qquad (2.5)$$

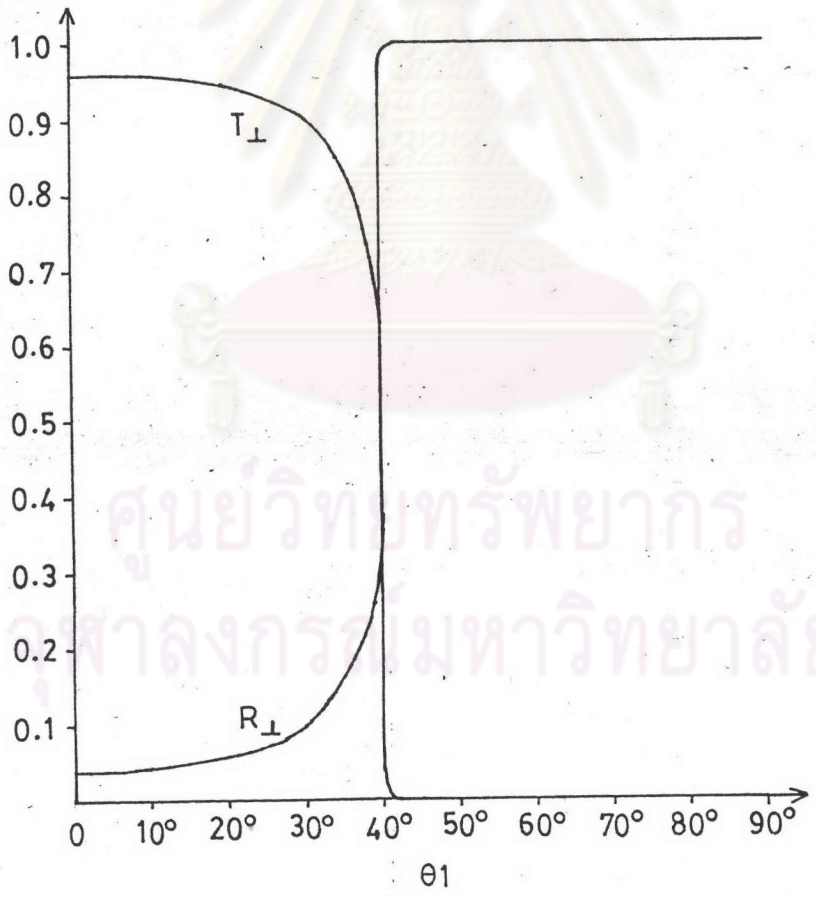
$$T_{\perp} = \frac{4n_1 \cos\theta_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_1}}{\left|n_1 \cos\theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_1}\right|^2} \qquad (2.6)$$

$$R_{//} = \frac{\left|n_2 \cos\theta_1 - n_1/n_2 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_1}\right|^2}{\left|n_2 \cos\theta_1 + n_1/n_2 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_1}\right|^2} \qquad (2.7)$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

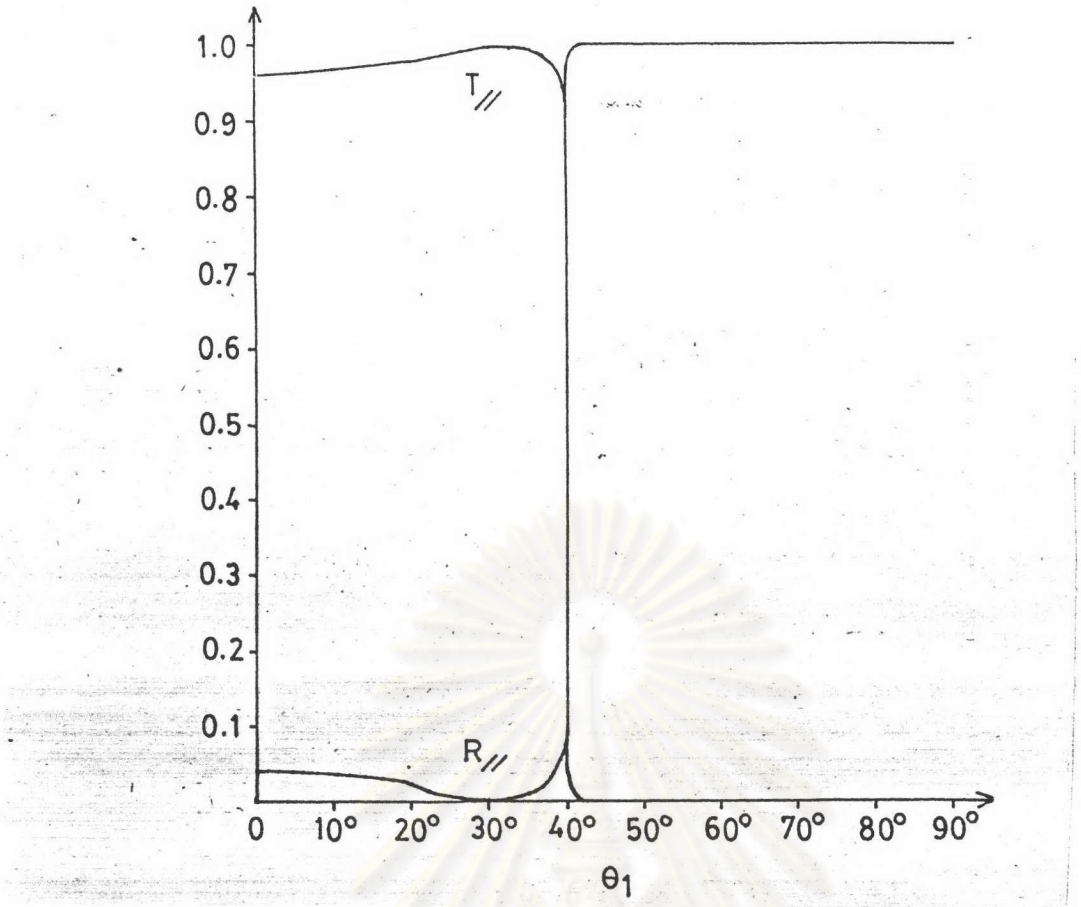
$$T_{//} = \frac{4n_1 \cos\theta_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_1}}{\left| n_2 \cos\theta_1 + n_1/n_2 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_1} \right|^2} \qquad (2.8)$$

รูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 แสดงค่า $R_{\perp}$, $T_{\perp}$ และ $R_{//}$, $T_{//}$ ของกรณีที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านจากแก้วเข้าสู่อากาศ คือ $n_1 = 1.5$ และ $n_2 = 1.0$ จากรูปทั้งสองจะเห็นได้ว่า ถ้ามุมตกกระทบใกล้ 0 องศา จะมีการสะท้อนกำลังคลื่นกลับมาประมาณ 4% และส่วนที่เหลือจะส่งผ่านเข้าสู่อากาศ และในอีกกรณีหนึ่งคือมุมตกกระทบใกล้เคียงกับ 90 องศา จะมีกำลังคลื่นสะท้อนกลับมาเกือบ 100% โดยไม่มีเพาเวอร์ส่งผ่านเข้าสู่อากาศเลย กรณีแรกนั้นเป็นกรณีที่ใกล้เคียงกับการสะท้อนกลับจากปลายสายของเส้นใยแสง ซึ่งมุมตกกระทบจะใกล้เคียงกับ 0 องศา ส่วนกรณีหลังนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การสะท้อนกลับหมด (Total reflection) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้สารไดอิเล็กตริกสามารถนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ในขณะเดียวกันก็เป็นหลักการพื้นฐานในการนำแสงของเส้นใยแสงด้วย



รูปที่ 2.2 อัตราการสะท้อนกำลังคลื่นและอัตราการส่งผ่านกำลังคลื่นในกรณีของระนาบที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 อัตราการสะท้อนกำลังคลื่นและอัตราการส่งผ่านกำลังคลื่นในกรณีของระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้า

ในกรณีที่แสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผ่านจากอากาศเข้าสู่แก้ว ก็จะมีการสะท้อนกลับและการส่งผ่านของกำลังคลื่นเกิดขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามจะมีกรณีที่เฉพาะกรณีหนึ่งที่ไม่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่น คือกรณีที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมบริวสเตอร์ (Brewster's angle) ในกรณีของระนาบแบบขนานกับสนามไฟฟ้า เมื่อมุมตกกระทบของคลื่นเท่ากับมุมบริวสเตอร์กำลังคลื่นทั้งหมดจะส่งผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่สองโดยไม่สะท้อนกลับมายังตัวกลางที่หนึ่ง

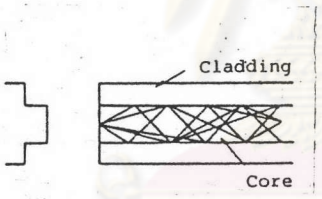
ปรากฏการณ์ที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะเป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจตำแหน่งสายขาดของเส้นใยแสงในงานวิจัยนี้

2.2 ประเภทของเส้นใยแสงและคุณสมบัติในการส่งผ่านแสง

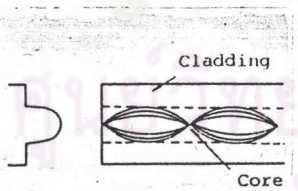
2.2.1 ประเภทของเส้นใยแสง[1]

เส้นใยแสงนั้นถ้าแบ่งตามวัสดุที่ใช้ในการผลิตจะแบ่งได้กว้าง ๆ ออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ ชนิดที่ทำด้วยพลาสติก และชนิดที่ทำด้วยแก้ว ชนิดที่ทำด้วยพลาสติกนั้นมีค่าการสูญเสียสูง จึงไม่ถูกนำมาใช้ในงานสื่อสารโทรคมนาคม สำหรับชนิดที่ทำด้วยแก้วนั้น

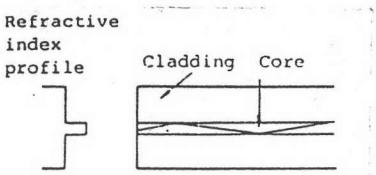
จะมีค่าการสูญเสียต่ำ จึงถูกนำมาใช้ในงานสื่อสารโทรคมนาคมโดยทั่วไป โครงสร้างของเส้นใยแสงที่ใช้ในงานสื่อสารโทรคมนาคมโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 3 แบบ ตามลักษณะการกระจายของดัชนีหักเห คือ (1) แบบ Step index (2) แบบ Graded index (3) แบบ Single mode โดยที่ทั้งสามแบบนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน คือ 125 μm รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างและลักษณะการกระจายของดัชนีหักเหของสายทั้งสามแบบนี้ เส้นใยแสงแบบ Step index และแบบ Graded index จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนที่เป็นคอร์ (core) เป็น 50 μm และเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนที่รวมแคลดดิ้ง (cladding) เข้าไปด้วยจะเป็น 125 μm เนื่องจากเส้นผ่าศูนย์กลางของคอร์มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของแสงที่ส่งผ่านซึ่งมีค่าประมาณ 1 μm แสงจึงส่งผ่านสายชนิดนี้ได้หลาย ๆ โหมดพร้อมกัน โดยที่ในสายแบบ Step index โหมดของแสงทั้งหลายนี้จะส่งผ่านไปด้วยความเร็วกรุ๊ปแตกต่างกัน ซึ่งทำให้พัลส์ของแสงที่ส่งออกไปจะค่อย ๆ ลู่กว้างออกเพราะกำลังคลื่นที่ไปกับโหมดต่าง ๆ เดินทางถึงตำแหน่งเดียวกันไม่พร้อมกัน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Modal dispersion ปรากฏการณ์นี้จะเป็นผลเสียเพราะจะทำให้แบนด์วิดท์ของเส้นใยแสงแคบลง เส้นใยแสงแบบ Step index นี้จึงไม่ถูกนำมาใช้ในการส่งสัญญาณความถี่สูง ๆ เป็นระยะทางไกล ๆ



(ก) แบบ step index



(ข) แบบ Graded index



(ค) แบบ Single mode

รูปที่ 2.4 โครงสร้างและลักษณะการกระจายของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงแบบต่าง ๆ

อันที่จริงการลู่ออกของพัลส์ของแสงนั้นนอกจากจะเกิดจาก Modal dispersion แล้วยังเกิดจาก Material dispersion และ Waveguide dispersion ด้วย แต่โดยทั่วไปผลกระทบจาก Modal dispersion จะมีขนาดใหญ่กว่าอีกสองอันที่เหลืออย่างมาก ๆ[๘]

เส้นใยแสงแบบ Graded index นั้นถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาจาก Modal dispersion ดังกล่าว เพราะการทำให้ดัชนีหักเหในแนวรัศมีมีการกระจายในรูประฆังนี้จะทำให้ความเร็วกรุ๊ปของโหมดต่าง ๆ ใกล้เคียงกันมาก Modal dispersion ก็จะส่งผลกระทบในการส่งผ่านพัลส์ของแสงน้อยลง เพราะฉะนั้นเส้นใยแสงแบบนี้จึงมีที่ใช้ในงานสื่อสารโทรคมนาคมมากกว่าแบบแรก

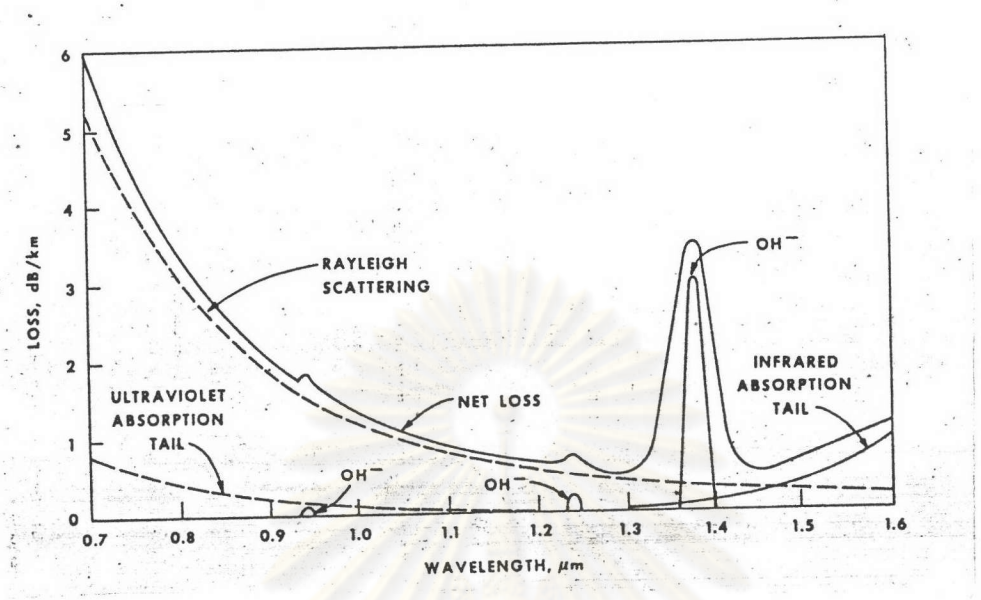
เส้นใยแสงแบบที่สามคือ แบบ Single mode นั้น จากรูปที่ 2.4 (ค) จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาในแง่ของการกระจายของดัชนีหักเหแล้วจะเหมือนกับ Step index แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์จะเล็กกว่าคือ จะเหลือประมาณ 10 μm การทำคอร์ให้มีขนาดเล็กนี้ก็เพื่อให้โหมดของแสงที่ส่งผ่านได้มีเพียงโหมดเดียวคือ โหมดพื้นฐาน ในเงื่อนไขเช่นนี้ปัญหาของ Modal dispersion ก็จะหมดไป การลู่กว้างออกของพัลส์ของแสงก็จะเกิดจาก Material dispersion และ Waveguide dispersion เท่านั้น ดังนั้นเส้นใยแสงแบบนี้จึงเหมาะสำหรับการส่งสัญญาณที่มีความถี่สูงเป็นระยะทางไกล ๆ

2.2.2 <u>การบั่นทอนกำลังคลื่นในเส้นใยแสง</u>

การบั่นทอนกำลังคลื่นในเส้นใยแสงนั้นมีสาเหตุหลัก ๆ 5 ประการ ดังนี้

(1) การดูดกลืนกำลังคลื่นของสารซิลิก้า
(2) การดูดกลืนกำลังคลื่นของอิออนของสิ่งแปลกปน
(3) การบั่นทอนกำลังคลื่นเนื่องจาก Rayleigh scattering
(4) การบั่นทอนกำลังคลื่นเนื่องจาก Waveguide scattering
(5) การบั่นทอนกำลังคลื่นเนื่องจาก Microbending

รูปที่ 2.5 แสดงผลของการบั่นทอนจากข้อ (1) ถึง (3) จากรูปจะเห็นได้ว่าการดูดกลืนกำลังคลื่นของสารซิลิก้านั้น ในย่านความยาวคลื่นอุลตร้าไวโอเลตจะมีค่าต่ำมากจนไม่มีผลแต่อย่างไร แต่การดูดกลืนกำลังคลื่นในย่านอินฟราเรดนั้นจะมีค่าสูง และเป็นตัวกำหนดความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถส่งผ่านเส้นใยแสงแบบนี้ได้ ซึ่งความยาวคลื่นนี้จะมีค่าประมาณ 1.7 μm



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติในการบั่นทอนกำลังคลื่นของเส้นใยแสง

สำหรับการดูดกลืนกำลังคลื่นของอิออนของสิ่งแปลกปนนั้นอิออนที่เป็นปัญหามาก คือ อิออนไฮดรอกซิล $(OH)^-$ อิออนของเหล็ก (Fe^{2+}) อิออนทองแดง (Cu^{2+}) และอิออนโครเมียม (Cr^{3+}) อิออนทั้งสี่นี้จะมีศูนย์กลางของการดูดกลืนอยู่ความยาวคลื่น 2.7 μm 1.1 μm, 0.85 μm และ 0.65 μm ตามลำดับ สำหรับอิออนของไฮดรอกซิลนั้นนอกจากความคลื่น 2.7 μm แล้ว ยังดูดกลืนความยาวคลื่น 1.39 μm, 1.25 μm และ 0.95 μm ด้วย ดังจะเห็นได้จากค่าการบั่นทอนสัญญาณในรูป 2.5

การบั่นทอนสัญญาณเนื่องจาก Rayleigh scattering นั้น เกิดจากปรากฏการณ์ที่เนื้อสารซิลิก้ามีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอเพราะในกระบวนการผลิตต้องมีการให้ความร้อนแก่สารซิลิก้าแล้วปล่อยให้เย็นลง ในช่วงของการเย็นตัวลงนี้สารซิลิก้าจะเข้าสู่ภาวะเสถียรโดยที่มีค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการกระจัดกระจายของคลื่น และเป็นการบั่นทอนกำลังคลื่นที่ส่งผ่าน ค่าการบั่นทอนกำลังคลื่นเนื่องจาก Rayleigh scattering นี้ จะแปรผกผันกับ λ^4 เพราะฉะนั้นที่ความยาวคลื่นในย่านอินฟราเรดที่มากกว่า 2 μm ขึ้นไปจะมีปัญหาน้อยมาก แต่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าอินฟราเรดลงมา จะมีค่าใหญ่กว่าการบั่นทอนสัญญาณจากการดูดกลืน

สำหรับการบั่นทอนกำลังคลื่นเนื่องจาก Waveguide scattering และ Microbending นั้น เกิดขึ้นจากความไม่สมบูรณ์ของเส้นใยแสงที่ได้จากกระบวนการผลิต

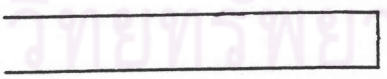
กล่าวคือ ผิวขอบเขตระหว่างคอร์กับแคลดดิ้งโดยทั่วไปจะไม่เรียบ ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระจัดกระจายของคลื่นและเกิดการบั่นทอนกำลังคลื่น เราเรียกสภาพดังกล่าวนี้ว่า Waveguide scattering สำหรับ Microbending นั้น คือสภาพที่แกนของเส้นใยแสงเป็นเส้นโค้งแทนที่จะเป็นเส้นตรง ซึ่งเราพบว่าการที่แกนของเส้นใยแสงเป็นเส้นโค้งนี้จะทำให้เกิดโหมดที่กระจายคลื่น (Radiation mode) ขึ้นซึ่งก็จะทำให้เกิดการบั่นทอนกำลังคลื่นเช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีในการผลิตเส้นใยแสงในปัจจุบันได้พัฒนาไปมาก จนทำให้ค่าการบั่นทอนกำลังคลื่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตมีค่าต่ำลงมาก และใกล้เคียงกับการสูญเสียโดยเนื้อแท้ของสารคือ การดูดกลืนกำลังคลื่นในย่านอินฟราเรด และการเกิด Rayleigh scattering ในย่านความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าอินฟราเรด

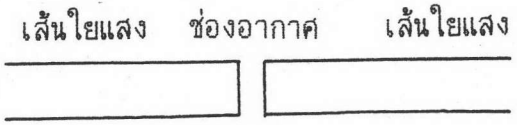
โดยสรุปแล้วจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า ความยาวคลื่นที่เราใช้งานอยู่ในปัจจุบัน คือ 0.85 μm และ 1.3 μm อยู่ในช่วงที่เส้นใยแสงแบบซิลิก้านี้มีค่าการบั่นทอนกำลังคลื่นค่อนข้างต่ำ คือ 2.5 dB/km และ 0.7 dB/km ตามลำดับ อย่างไรก็ตามความยาวคลื่นที่มีค่าการบั่นทอนกำลังคลื่นต่ำที่สุดจะมีค่าประมาณ 1.55 μm และเทคโนโลยีสำหรับความยาวคลื่นนี้ก็ได้รับการพัฒนาไปมาก จนคาดว่าจะสามารถนำมาใช้งานในระบบจริงในอนาคตอันใกล้นี้

2.3 หลักการที่ใช้ในการวัดตำแหน่งสายขาดของเส้นใยแสง

การขาดของเส้นใยแสงนั้นจะเกิดขึ้นในสองลักษณะหลัก ๆ คือ สายเคเบิลขาด และเส้นใยแสงแตกร้าวภายใน การขาดในลักษณะทั้งสองนี้จะทำให้เกิดเงื่อนไขขอบเขตในลักษณะที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เงื่อนไขขอบเขตนี้จะทำ



(ก) กรณีเคเบิลขาด



(ข) กรณีเส้นใยแสงแตกร้าวภายใน

รูปที่ 2.6 สภาพการขาดของเส้นใยแสง

ให้เกิดการสะท้อนของแสงที่ตำแหน่งสายขาดทั้งคู่ เนื่องจากแสงที่ส่งผ่านมาตามเส้นใยแสงที่มีค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.5 เมื่อเคลื่อนที่มาพบอากาศซึ่งมีค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.0 ก็จะเกิดการส่งผ่านเข้าไปในอากาศและการสะท้อนกลับเข้าสู่เส้นใยแสงตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 เนื่องจากเส้นใยแสงมีขนาดเล็กมาก แสงที่เคลื่อนที่เข้าหาผิวขอบเขตจะอยู่ในแนวแกน ดังนั้นถ้าผิวของการขาดปลายของเส้นใยแสงอยู่ในรูปตั้งฉากกับแนวแกนดังที่แสดงไว้ในรูป การสะท้อนกลับของกำลังแสงก็จะสูงที่สุด

ในกรณีของรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งเป็นการแตกร้าวภายในและมีช่องอากาศเกิดขึ้นนั้น ที่จริงจะเกิดผิวขอบเขตขึ้น 2 ตำแหน่ง คือ ระหว่างเส้นใยแสงกับอากาศ และระหว่างอากาศกับเส้นใยแสง ในสภาพดังกล่าวนี้แสงที่ส่งผ่านจากผิวขอบเขตแรกเข้าสู่อากาศจะถูกสะท้อนกลับมาอีกตรงผิวขอบเขตที่สอง ดังนั้นตามเงื่อนไขในรูป (ข) นี้จะมีแสงสะท้อนกลับมาได้มากกว่ารูป (ก)

เครื่องวัดตำแหน่งสายขาดของเส้นใยแสงจะใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ โดยทำการส่งพัลส์ของแสงออกไป แล้วรับพัลส์ของแสงที่สะท้อนกลับมา ถ้าเครื่องวัดทำการจับเวลาตั้งแต่ส่งพัลส์ของแสงออกไปจนได้รับพัลส์ของแสงที่สะท้อนกลับมา ช่วงเวลาที่ได้นี้ก็จะเท่ากับเวลาที่แสงต้องใช้ในการเดินทางไปกลับระหว่างเครื่องวัดกับจุดที่สายขาด ดังนั้นถ้าให้ความเร็วของแสงในเส้นใยแสงเป็น v ก็จะสามารถคำนวณหาระยะทางได้ดังนี้

$$d = v \times \frac{t}{2} \qquad (2.9)$$

ในขณะที่ d เป็นระยะทาง และ t เป็นช่วงเวลาระหว่างพัลส์ ในกรณีของเส้นใยแสงซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกนั้น ความเร็วของแสงในเส้นใยแสงจะมีค่าเป็น

$$v = \frac{c}{n} \qquad (2.10)$$

ในขณะที่ c เป็นความเร็วของแสงในอากาศว่าง และ n เป็นค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแสง เมื่อรู้ค่า n ก็จะสามารถคำนวณหาระยะทาง d ได้โดยใช้สมการ (2.9) และสมการ (2.10) ยกตัวอย่างเช่น ถ้าค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแสงเป็น 1.5 v จะเท่ากับ 2×10^8 m/s และจะได้

$$d = 10^8 \, t \, m \qquad (2.11)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย