

การศึกษาผลกระทบ Four Wave Mixing และ Stimulated Brillouin Scattering ในระบบส่งสัญญาณ DWDM ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสง

วิศวิทย์ ราชณรงค์^{* 1)} และ สุทธิชัย นพนาศิพงษ์²⁾

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาผลกระทบจากปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้น Four Wave Mixing (FWM) และ Stimulated Brillouin Scattering (SBS) ที่เกิดขึ้นในระบบส่งสัญญาณ DWDM โดยทำการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสง 5 ชนิด ได้แก่ Single Mode Fiber (SMF), Dispersion Shift Fiber (DSF), Non-Zero Dispersion Fiber (NZDF), Non-Zero Dispersion Shift Fiber (NZDSF) และ Dispersion Shift Fiber (DCF) ที่ระยะห่างของช่องสัญญาณ 100GHz, 50GHz และ 25GHz เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์หาข้อดีข้อเสียของเส้นใยแก้วแต่ละชนิด เพื่อเสนอแนวทางในการลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้น FWM และ SBS ในระบบส่งสัญญาณ DWDM จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบ FWM และ SBS ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วทั้ง 5 ชนิด เส้นใยแก้วชนิด DCF เกิดผลกระทบจาก FWM น้อยสุดและมีค่ากำลังเทรชโฮลด์ของ SBS ที่น้อยสุดเช่นกัน จึงทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางที่ไกลกว่าเส้นใยแก้วชนิดอื่นๆ สาเหตุที่เส้นใยแก้วชนิด SMF, NZDF และ NZDSF นั้นเกิดผลกระทบจาก FWM ที่สูงกว่าเส้นใยแก้วชนิด DCF นั้นเพราะมีค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันที่ต่ำกว่าเส้นใยแก้วชนิด DCF และเส้นใยแก้วชนิด DSF เกิดผลกระทบจาก FWM สูงสุดเพราะผลกระทบจาก FWM เกิดขึ้นสูงสุดที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับ 0 และจากการเปรียบเทียบเส้นใยแก้วทั้ง 5 ชนิด ทำให้รู้ถึงตัวแปรที่ทำให้เกิดผลกระทบจากปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ และโครมาติกดิสเพอร์ชัน ทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลง, ค่ากำลังเทรชโฮลด์ของ SBS เพิ่มขึ้น และกำลังอินพุตเพิ่มขึ้น เป็นต้น

คำสำคัญ : Four Wave Mixing, Stimulated Brillouin Scattering, Dense Wavelength Division Multiplexing

* 1) นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520, Corresponding Author, อีเมล: s2611226@kmitl.ac.th

2) ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520, อีเมล: knsuthic@kmitl.ac.th

A Study on the Effect of Four Wave Mixing and Stimulated Brillouin Scattering of DWDM Transmission System in Optical Fiber

Vissavavit Rachnarong^{*1)} and Suthichai Noppanakeepong²⁾

Abstract

This paper presents a study on the effect of four wave mixing (FWM) and stimulated Brillouin scattering (SBS) of DWDM transmission system in optical fiber by comparing the effect of five types in optical fibers such single mode fiber (SMF), dispersion shift fiber (DSF), non-zero dispersion fiber (NZDF), non-zero dispersion shift fiber (NZDSF) and dispersion compensating fiber (DCF) on 100GHz, 50GHz and 25GHz for frequency channel spacing. We have analyzed the advantage and disadvantage for each type of optical fiber. This paper is proposed the method to improve the effect of non-linear phenomena on FWM and SBS due to optical fiber non-linearity in DWDM transmission system by comparing the five types of optical fiber. We found that the effect of DCF type is shown better performance. From simulation results, it shows lower FWM power and threshold power. The optical fiber of DCF type is suitable for transmitted signal in short distance compare with other type of optical fiber. The FWM power of SMF, NZDF and NZDSF are more than DCF because of the chromatic dispersion less than chromatic dispersion of DCF type. On the other hand the highest FWM power occurs due to chromatic dispersion of DSF type equal to 0. The data analysis is indicated some parameters cause by the effect of non-linear phenomena such increasing the effective core area, chromatic dispersion (CD) which decrease FWM, increase threshold power of SBS and input power.

Keywords: Four Wave Mixing, Stimulated Brillouin Scattering, Dense Wavelength Division Multiplexing

* ¹⁾ Post graduated Students, Department of Telecommunication Engineering, King's Mongkut Institute of Technology Ladkrabang 10520, Corresponding Author, E-mail: s2611226@kmitl.ac.th

²⁾ Assistant Professor, Department of Telecommunication Engineering, King's Mongkut Institute of Technology Ladkrabang 10520, E-mail: knsuthic@kmitl.ac.th

1. บทนำ

ในระบบสื่อสารสัญญาณด้วยแสงทุกวันนี้ได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วเพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น โดยความต้องการหลักคือเพิ่มจำนวนความจุในการส่งสัญญาณให้มีความมากที่สุด จึงได้มีการพัฒนาระบบส่งสัญญาณ DWDM เกิดขึ้นในระบบส่งสัญญาณ DWDM นี้ สามารถส่งสัญญาณจำนวนมากไปในเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว ทำให้สามารถส่งข้อมูลจำนวนมากผ่านเส้นใยแก้วนำแสงได้มากขึ้น แต่ในผลดีนี้ทำให้เกิดผลกระทบจากปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสง (Rajiv et al., 2002) จึงทำให้เกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณไปในเส้นใยแก้วนำแสงเกิดขึ้น ผลกระทบหลักที่เกิดขึ้นเช่น FWM, SBS และ SRS เป็นต้น (Shamim et al., 2005) เมื่อเกิดผลกระทบนี้ขึ้นก็ต้องมีการพัฒนาเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้น เส้นใยแก้วนำแสง ปัจจุบันนี้เส้นใยแก้วชนิด NZDF, NZDSF และ DCF ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้นจาก FWM ดังนั้นเราจึงได้ทำการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเส้นใยแก้วแต่ละชนิด ที่เกิดผลกระทบจากปรากฏการณ์ FWM และ SBS (Zhang et al., 2000) เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มานำมาวิเคราะห์หาข้อดีข้อเสียของเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิดเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและการออกแบบเพื่อลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้น

2. ทฤษฎี

2.1 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจาก Stimulated Brillouin Scattering (SBS)

SBS เกิดขึ้นจากผลกระทบของการกระจายเปลี่ยนทิศทางของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง กรณีของ SBS (Rajiv et al., 2002) นั้นความสัมพันธ์ของปฏิริยาของคลื่นแสงกับตัวกลางของเส้นใยแก้วนำแสงจะเป็นแบบ Acoustic Phonons โดยปฏิริยาจะเกิดขึ้นกับช่องสัญญาณที่มีแถบความกว้างของสัญญาณสเปกตรัมแคบมากประมาณ $\Delta f_B = 20\text{MHz}$ ที่ความยาวคลื่น $1.55\mu\text{m}$ การกระจายของแสงจากสัญญาณคลื่นขยาย

และสัญญาณคลื่นกระตุ้นจะอยู่ในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น SBS จะไม่เกิดปฏิริยาระหว่างช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกันมาก จนกว่าระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณจะมีความยาวคลื่นที่แคบมากกว่า $\Delta f_B = 20\text{MHz}$ ซึ่งเป็นขอบเขตที่จำกัดของ SBS โดย SBS ทำให้เกิดอัตราขยายของสัญญาณในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของการแพร่กระจายแสงของสัญญาณ คือย้อนกลับสู่แหล่งกำเนิดของสัญญาณ จะทำให้สัญญาณที่ส่งออกไปมีกำลังของสัญญาณลดลง ส่งผลให้เกิดความเสื่อมขึ้นในช่องสัญญาณ การคำนวณค่าเทรชโฮลด์ของกำลัง (Threshold Power) สามารถประมาณได้ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้ (Rajiv et al., 2002), (Govind P. Agrawal, 2002)

$$P_{th} \approx \frac{21 b A_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (1)$$

เมื่อ g_B คือค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SBS, b คือค่าความสัมพันธ์ของโพลาไรเซชันของคลื่นขยายและคลื่นกระตุ้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 (บทความนี้กำหนดให้กรณีที่ดีที่สุด $b = 1$), L_{eff} คือระยะทางประสิทธิผล, A_{eff} คือพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของเส้นใยแก้วนำแสง

กำลังอินพุตสูงสุดสามารถคำนวณได้จาก (Govind P. Agrawal, 2002), (Shamim et al., 2005)

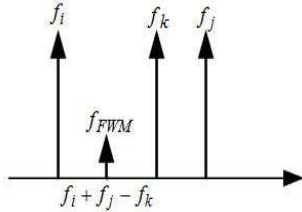
$$P_{in} (Max) = \frac{\ln(10) \alpha}{100 \gamma} \quad (2)$$

เมื่อ α คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง, γ คือค่าสัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้น

2.2 ผลกระทบที่เกิดจาก Four Wave Mixing (FWM)

ระบบส่งสัญญาณ DWDM ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกันและเป็นสาเหตุให้เกิดความเสื่อมลงของสัญญาณดังรูปที่ 1 เป็นรูปแบบการกระจายตัวของความถี่แสงเมื่อ f_i , f_j และ f_k เป็นสัญญาณความถี่ของแสงและ f_{FWM} เป็นความถี่ของแสงที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสัญญาณทั้งสามความถี่

เนื่องจากผลกระทบของ FWM ซึ่งหาได้จาก $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$ การเกิดขึ้นของ FWM เป็นผลกระทบจากค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันของเส้นใยแก้วซึ่งปกติจะทำให้เกิดความต่างเฟสระหว่างช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายความถี่ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 1 รูปแบบการกระจายของความถี่จากผลของ FWM

กำลังของสัญญาณด้านเอาต์พุตที่ความถี่ f_{FWM} ที่เกิดจากการรวมกันของความถี่ที่เป็นไปได้เมื่อมีช่องสัญญาณใช้งาน N ช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้ (Zhang et al., 2000), (Tan Saw Chin et al., 2008)

$$P_{FWM}(f_m) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{FWM}(f_{ijk}) \quad (3)$$

เมื่อ $P_{FWM}(f_{ijk})$ สามารถคำนวณได้จาก (Shuxian et al., 1999), (Zhang et al., 2000), (Tan et al., 2008)

$$P_{FWM}(f_{ijk}) = \frac{1024\pi^2}{n^2 \lambda^2 c^2} \left(\frac{d_{ijk} \chi^3 L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta_{ijk} \quad (4)$$

เมื่อ d_{ijk} คือองค์ประกอบที่แสดงสภาวะความเสื่อม, P_i, P_j, P_k คือกำลังของสัญญาณอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงที่ความถี่ f_i, f_j, f_k , λ คือความยาวคลื่นแสง, n คือดัชนีหักเหของคอร์, L คือความยาวเส้นใยแก้ว, χ^3 คือค่าความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 3, c คือความเร็วแสง, η_{ijk} คือประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM หาได้จาก (Shuxian et al., 1999), (Zhang et al., 2000)

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left\{ 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta \frac{L}{2})}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right\} \quad (5)$$

เมื่อ $\Delta\beta$ คือค่าความแตกต่างกันของค่าคงที่ในการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้ (Shuxian et al., 1999), (Zhang et al., 2000)

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} |f_i - f_k| |f_j - f_k| \left[D + \frac{\lambda^2}{2c} \frac{dD}{d\lambda} (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right] \quad (6)$$

เมื่อ D คือค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน, $\frac{dD}{d\lambda}$ คือความชันของดิสเพอร์ชัน, f_i, f_j, f_k คือค่าความถี่ใดๆในระบบ

เมื่อใช้การประมาณค่าแบบเกาส์เซียนความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM สามารถหาได้ดังนี้ (Zhang et al., 2000)

$$P_e = \frac{1}{2\pi} \int_Q^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (7)$$

เมื่อ t คือช่วงเวลา, Q คือค่า SNR ที่เกิดจากผลกระทบของ FWM หาได้จาก (Zhang et al., 2000)

$$Q = \frac{2\sqrt{P_0 e^{-\alpha L}}}{\sqrt{P_{FWM}}} \quad (8)$$

เมื่อ P_0 คือค่ากำลังของสัญญาณแสงด้านอินพุต

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Shuxian et al., 1999), (Zhang et al., 2000)

Parameters	Values
χ^3 (cm ³ /erg)	6×10 ⁻¹⁵
n	1.45
L_{eff} (km)	20.7
L (km)	100
α (dB/km)	0.21
c (m/s)	3×10 ⁸
f (THz)	192.1-196
λ (nm)	1529.55-1560.61

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิดที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Shamim et al., 2005)

Fiber Type	A_{eff} (μm^2)	D (ps/nm-km)	$\frac{dD}{d\lambda}$ (ps/ nm^2 -km)
SMF	80	17	0.08
DSF	50	0	0.06
NZDF	72	3	0.015
NZDSF	50	4.6	0.045
DCF	20	-80	-0.76

3. วิธิตำเนินการศึกษา

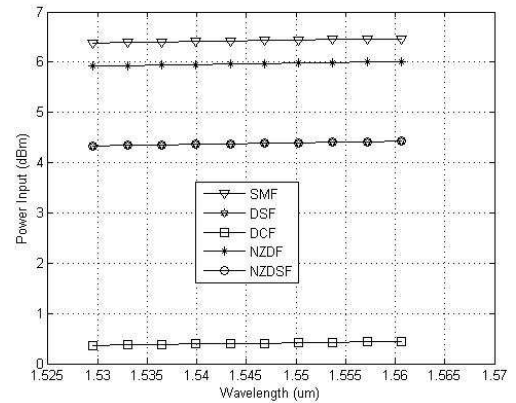
บทความนี้ทำการศึกษา (Rajiv et al., 2002), เกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นในการส่งสัญญาณ (Nonlinear Polarization) ในระบบการสื่อสารสัญญาณ DWDM เพื่อนำมาวิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์ FWM ต่อมาทำการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ FWM และ SBS ว่าเกิดผลกระทบเนื่องจากสิ่งใด เพื่อลดผลกระทบในการเกิด FWM และ SBS ในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง (Shamim et al., 2005) ทำการศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิด เช่น SMF, DSF, DCF, NZDF และ NZDSF เพื่อนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาหรือสมมติฐานที่ได้จากการศึกษา (Zhang et al., 2000) มาทำการวิเคราะห์และทำการนำเสนอในรูปแบบของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากผลกระทบของ FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM ช่วงความยาวคลื่น 1529.55 nm ถึง 1560.61nm (C-Band) ที่มีระยะห่างของช่องสัญญาณ 100GHz, 50GHz และ 25 GHz โดยผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้มานั้นจะถูกนำมาพล็อตเป็นกราฟโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ต่างๆ

4. ผลการศึกษา

4.1 กำลังอินพุตสูงสุด ($P_{in,max}$)

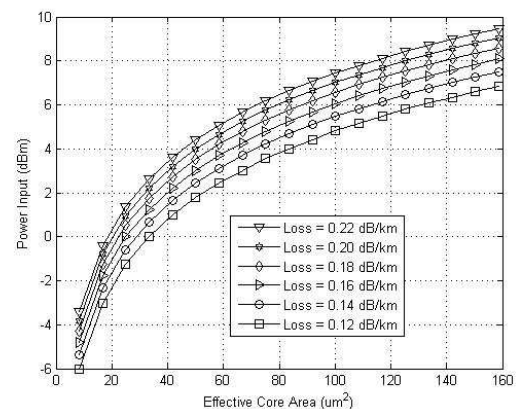
ค่ากำลังอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิดจากสมการที่ 2 มีค่าต่างกันไปตามขนาดพื้นที่หน้าตัด

ประสิทธิภาพ เมื่อกำลังอินพุตมากจะทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางที่ไกลขึ้น จากรูปที่ 2 กำลังอินพุตของ



รูปที่ 2 กำลังอินพุตสูงสุดในเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิด

เส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF (6.4241dBm) จะมีกำลังที่สูงสุดเนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพสูงสุด ตามมาด้วยเส้นใยแก้วชนิด NZDF (6.4241dBm), NZDSF = DSF (4.3829dBm) และ DCF (0.4035dBm) และจากรูปที่ 3 จะเห็นว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นกำลังอินพุตก็จะมีค่าที่มากขึ้นและเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียมีค่าลดลงจะทำให้กำลังอินพุตมีค่าลดลง แต่สามารถส่งสัญญาณได้ในระยะทางที่เท่าเดิม ในการส่งแบบ Single Mode นั้นเรา



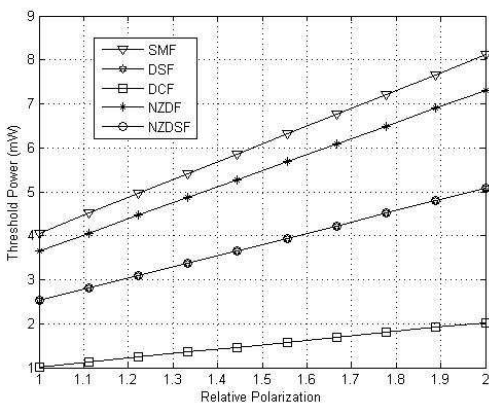
รูปที่ 3 กำลังอินพุตสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงตามพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ

สามารถเพิ่มพื้นที่หน้าตัดได้มากที่สุดประมาณ 158.74 μm^2 ($a \approx 6.4 \mu m$ หรือ $V < 2.405$) เท่านั้น (Shamim et al., 2005) เพราะว่าถ้ามีค่าสูงกว่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนโหมดเป็น Multi Mode เกิดขึ้น pure silica core

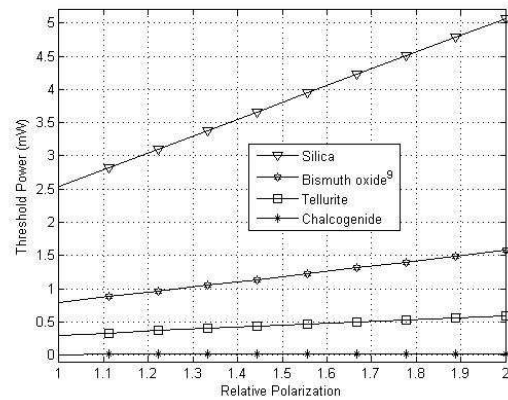
and 13.3% B_2O_3 :86.7% SiO_2 cladding) แต่การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดจะทำให้ค่าคอสเพอร์ชันมีค่าที่สูงขึ้น

4.2 ค่ากำลังเทรสโไฮด์ของ SBS (P_{th})

เมื่อทำการส่งกำลังที่สูงขึ้นจะทำให้ส่งได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น แต่ถ้าส่งกำลังที่เกินค่ากำลังเทรสโไฮด์ของ SBS (P_{th}) แล้ว จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้น SBS เกิดขึ้น ดังนั้นควรจะรักษาระดับกำลังของสัญญาณให้ต่ำกว่าระดับของค่าเทรสโไฮด์ ซึ่งอาจจะต้องลดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณลง จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าค่ากำลังเทรสโไฮด์ของ SBS จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความสัมพันธ์ของโพลาไรเซชัน (b) มีค่าที่สูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่ากำลังเทรสโไฮด์ของ SBS (จากสมการที่ 1) ในเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF (6.0831dBm) มีค่าสูงสุดเนื่องจากมีค่าพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพที่สูงที่สุด ตามมาด้วยเส้นใยแก้วนำแสงชนิด NZDF (5.6255dBm), NZDSF = DSF (4.0418dBm) และ DCF (0.0625dBm) ตามลำดับ ถ้าค่ากำลังเทรสโไฮด์สูงขึ้น จะทำให้สาร (ข) ส่งสัญญาณได้ระยะทางที่ไกลขึ้น แต่ถ้าค่ากำลังเทรสโไฮด์ต่ำก็จะทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ระยะทางที่ใกล้



รูปที่ 4 ค่ากำลังเทรสโไฮด์ของ SBS ในเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิด



รูปที่ 5 ค่ากำลังเทรสโไฮด์ของ SBS ในวัสดุแต่ละชนิด

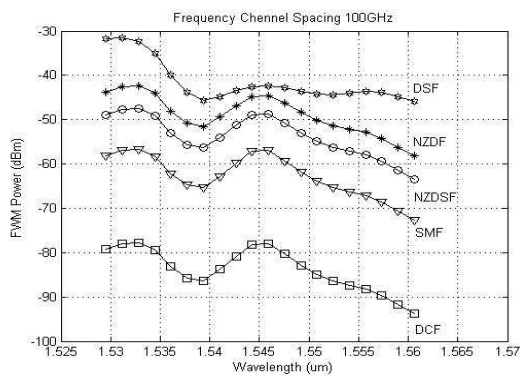
ในรูปที่ 5 จะเห็นว่าเมื่อสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SBS (g_B) มีค่ามากขึ้น จะทำให้กำลังเทรสโไฮด์ของ SBS มีค่าที่ต่ำลง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งวัสดุชนิดซิลิกาจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายสัญญาณของ SBS น้อยสุด จึงมีค่ากำลังเทรสโไฮด์ของ SBS ที่สูงกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ในบทความนี้เราใช้เส้นใยแก้วที่ทำจากซิลิกา (Rajiv et al., 2002) ผลกระทบของ SBS นี้สามารถลดลงได้ด้วยการเพิ่มไบนารีของแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงโดยการสั่นสะเทือนโมเลกุลของเลเซอร์ด้วยความถี่เล็กน้อยที่มีความเหมาะสม (ประมาณ 200MHz)

ตารางที่ 3 ค่ากำลังเทรสโไฮด์ของ SBS ในวัสดุแต่ละชนิด (Guanshi Qin et al., 2008)

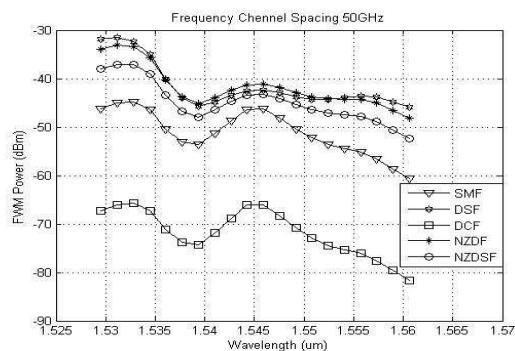
Material Type	g_B (m/W)	P_{th} mean)
Silica	2×10^{-11}	3.8043mW
Bismuth oxide	6.43×10^{-11}	1.1833mW
Tellurite	1.6989×10^{-10}	0.4479mW
Chalcogenide	6.08×10^{-9}	0.0125mW

4.3 กำลังของ FWM (P_{FWM})

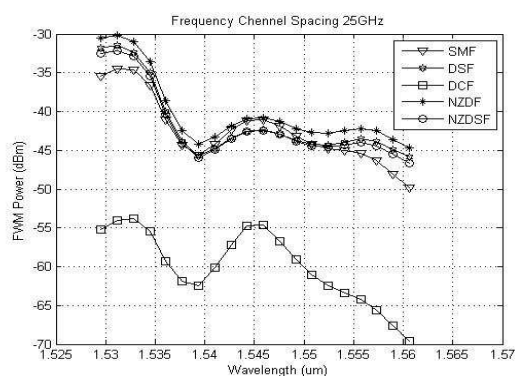
กำลังของ FWM เกิดขึ้นเนื่องจากการรวมกันของความถี่ที่อยู่ใกล้เคียง ทำให้เกิดเป็นกำลังที่ไปแทรกทอดหรือรบกวนเข้าไปในกำลังหลักทำให้เกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังของ FWM ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้ว 5 ชนิด ดังรูปที่ 6



ก



ข



ค

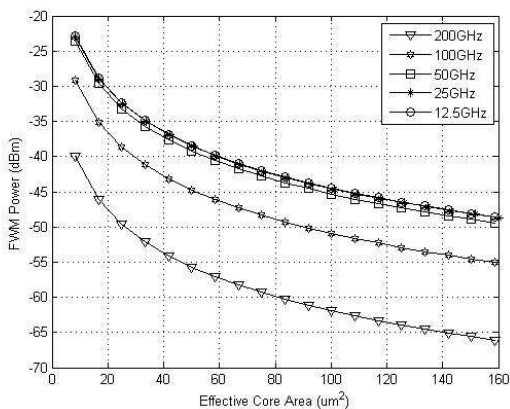
รูปที่ 6 ความแตกต่างกำลังของ FWM ก) ระยะห่างความถี่ 100GHz, ข) ระยะห่างความถี่ 50GHz และ ค) ระยะห่างความถี่ 25GHz

ตารางที่ 4 กำลังของ FWM ในเส้นใยแก้ว 5 ชนิด ที่ระยะห่างช่องสัญญาณ 100GHz, 50GHz และ 25GHz

Fiber Type	Freq. Ch. Spacing	FWM Power	P_{FWM} / P_{in} (%)
SMF	100GHz	533.58pW	1.3149×10^{-5}
DSF	100GHz	71.136nW	0.0028
NZDF	100GHz	12.915nW	3.5362×10^{-4}
NZDSF	100GHz	4.2117nW	1.6606×10^{-4}
DCF	100GHz	4.1237pW	4.0648×10^{-7}
SMF	50GHz	7.8431nW	1.9328×10^{-4}
DSF	50GHz	71.804nW	0.0028
NZDF	50GHz	68.509nW	0.0019
NZDSF	50GHz	33.629nW	0.0013
DCF	50GHz	66.115pW	6.5170×10^{-6}
SMF	25GHz	58.193nW	0.0014
DSF	25GHz	71.912nW	0.0028
NZDF	25GHz	100.13nW	0.0027
NZDSF	25GHz	66.599nW	0.0026
DCF	25GHz	1.0101nW	9.9566×10^{-5}

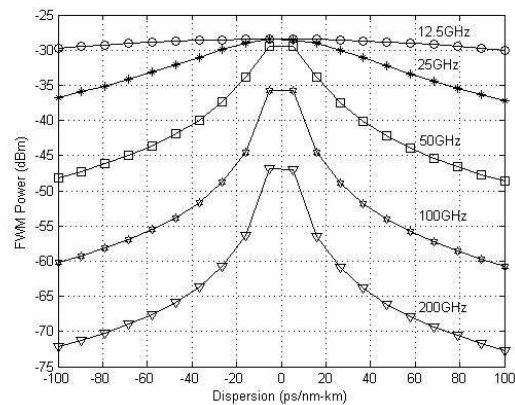
จากการวิเคราะห์กำลังของ FWM (สมการที่ 3) ในเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 5 ชนิด เมื่อทำการรักษาค่ากำลังส่งของสัญญาณไม่ให้สูงเกินกว่าค่ากำลังเทรชโฮลด์ของ SBS ที่ระยะห่างความถี่ 100GHz, 50GHz และ 25GHz เส้นใยแก้วนำแสงชนิด DCF เกิดผลกระทบจากค่ากำลังของ FWM น้อยสุด ตามมาด้วยเส้นใยแก้วชนิด SMF, NZDSF, NZDF และ DSF ตามลำดับ ถึงแม้ว่าเส้นใยแก้วชนิด DCF จะมีกำลังของ FWM ที่เกิดขึ้นน้อยสุด แต่ก็มีค่ากำลังเทรชโฮลด์ของ SBS น้อยสุดด้วยเช่นกัน ต่างจากเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF ที่มีกำลังเทรชโฮลด์ของ SBS มากสุด ทำให้สามารถส่งข้อมูลในระยะทางที่ไกลกว่าเส้นใยแก้วนำแสงชนิด DCF ซึ่งทำให้ประหยัดงบประมาณที่ทำให้ลด OA (Optical Amplifier) ลงได้ และเส้นใยแก้วชนิด NZDF จะเกิดกำลังของ FWM ที่มากกว่าเส้นใยแก้วชนิด NZDSF แต่ก็มีปริมาณที่

ใกล้เคียงกันจึงทำให้ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เส้นใยแก้วชนิด NZDF นั้นมีกำลังเทรสโวลด์ของ SBS ที่สูงกว่าและค่าดิสเพอร์ชันที่ต่ำกว่าเส้นใยแก้วชนิด NZDSF ดังนั้นในการใช้งานควรพิจารณาในการเลือกใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่เหมาะสมกับการใช้งาน และจากการเปรียบเทียบเส้นใยแก้วทั้ง 5 ชนิด ทำให้รู้ว่าค่ากำลังของ FWM จะเปลี่ยนแปลงตามค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของกำลัง FWM ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ

4.3.1 พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ (Rajiv et al., 2002 และ สมการที่ 4) ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแก้วนำแสงจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อกำลังของสัญญาณแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของคอร์และกำลังของสัญญาณมีการกระจายออกแบบไม่มีรูปแบบภายในพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสง คือการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของเส้นใยแก้วนำแสงจะทำให้ความเข้มแสงเฉลี่ยมีค่าลดลง จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าถ้าพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพมีค่าที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากำลังของ FWM มีค่าที่ต่ำลง ในการออกแบบต้องคำนึงถึงค่าผลต่างของดัชนีหักเห (Δ) ถ้าผลต่างของดัชนีหักเหมมีค่าที่ลดลงจะสามารถเพิ่มรัศมีของคอร์ได้มากขึ้น และพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

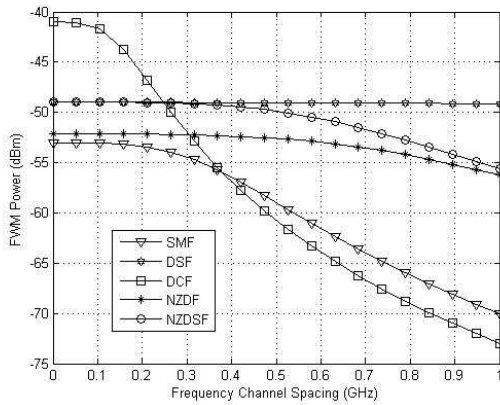


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของกำลัง FWM ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน

4.3.2 โครมาติกดิสเพอร์ชัน ทำให้ค่ากำลังของ FWM ลดลงเช่นกัน (สมการที่ 6) ดังรูปที่ 8 จะเห็นว่ากำลังของ FWM จะเกิดมากที่สุดที่ค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันเท่ากับ 0 (เส้นใยแก้วชนิด DSF เกิดผลกระทบจาก FWM มากสุด) และจะลดลงเมื่อค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันมีค่าสูงขึ้น แต่ถ้าค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันในเส้นใยแก้วนำแสงมีมากเกินไปไม่ดี เพราะจะทำให้รูปร่างของสัญญาณเกิดการบิดเบี้ยวไปจากเดิม แต่ค่าดิสเพอร์ชันนี้สามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการจัดการดิสเพอร์ชันที่เหมาะสม สำหรับเส้นใยแก้วชนิด DCF มีค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันเป็นลบนั้นก็เพราะ (Shamim et al., 2005) มีค่าผลต่างของดัชนีหักเหที่สูงทำให้ค่าเวฟไกต์ดิสเพอร์ชันมีค่าที่ต่ำ เมื่อค่าเวฟไกต์ดิสเพอร์ชันมีค่าต่ำทำให้ค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันมีค่าติดลบ

4.3.3 ความยาวของเส้นใยแก้ว เมื่อมีค่ามากขึ้นทำให้กำลังของ FWM มีกำลังงานที่ต่ำลง (สมการที่ 4) ดังนั้นเมื่อกำลังมีค่าลดลงเนื่องจากความยาวของเส้นใยแก้วมากขึ้นก็จำเป็นที่จะต้องเพิ่มค่ากำลังขึ้น แต่การเพิ่มของกำลังมีขีดจำกัดที่ค่ากำลังเทรสโวลด์ของ SBS ดังนั้นควรจจะรักษาระดับกำลังของสัญญาณให้ต่ำกว่าระดับของค่ากำลังเทรสโวลด์ของ SBS ซึ่งอาจจะต้องลดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณลง

4.3.4 กำลังอินพุต เมื่อมีค่ามากขึ้นค่ากำลังของ FWM นั้นก็จะมีค่าที่สูงขึ้น (สมการที่ 4) แต่ถ้ากำลังอินพุตมีค่าน้อยลงก็ทำให้กำลังของ FWM น้อยลงด้วย



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของกำลัง FWM ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณ

4.3.5 ระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณ เมื่อมีค่ามากขึ้นทำให้กำลังของ FWM มีค่าลดลง (สมการที่ 6) แต่ในการเพิ่มความถี่ของช่องสัญญาณจำเป็นต้องลดระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณลง จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าเมื่อป้อนกำลังอินพุตของแต่ละเส้นใยแก้วมีค่าเท่ากัน เส้นใยแก้วชนิด DCF มีค่ากำลังของ FWM สูงสุดที่ระยะห่างของความถี่เท่ากับ 0 เพราะว่าเส้นใยแก้วชนิด DCF นั้นมีพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด แต่เมื่อระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณมีค่ามากขึ้น จะเห็นได้ว่าค่ากำลังของ FWM ของเส้นใยแก้วชนิด DCF นั้นมีค่าต่ำสุดเนื่องจากค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแก้วชนิด DCF นั้นมีค่าที่สูงที่สุด ทำให้กำลังของ FWM มีความชันที่สุด จะเห็นว่าเส้นใยแก้วชนิด DCF กับเส้นใยแก้วชนิด DSF นั้นมีค่าที่แตกต่างกันชัดเจน เพราะว่าค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแก้วชนิด DSF เท่ากับ 0 (ความชันเท่ากับ 0)

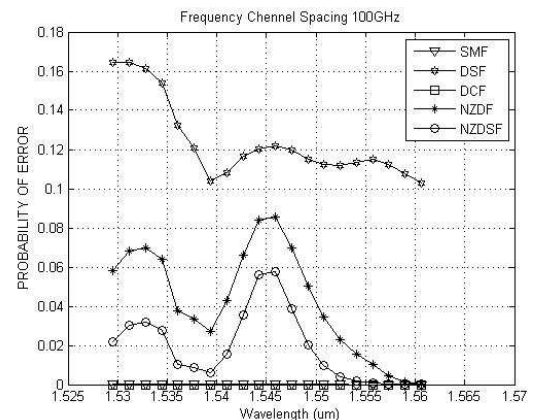
4.3.6 ดัชนีหักเห ในการออกแบบเส้นใยแก้วนำแสง (Shamim et al., 2005) เมื่อค่าผลต่างของดัชนีหักเหมีค่าน้อยลง จะสามารถเพิ่มพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพให้มีค่ามากขึ้นได้ ($V < 2.405$)

4.3.7 สัมประสิทธิ์การสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง จะพิจารณาได้จากรูปที่ 3 และข้อ 4.3.4 เมื่อสัมประสิทธิ์การ

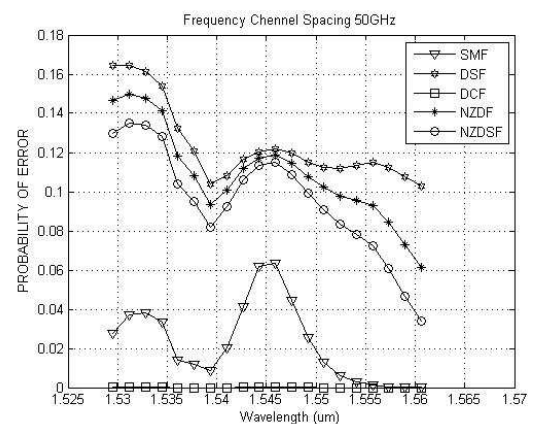
สูญเสียลดลงจะทำให้กำลังอินพุตลดลงและเมื่อกำลังอินพุตลดลงจะทำให้กำลังของ FWM ต่ำลง

4.4 ความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM (P_e)

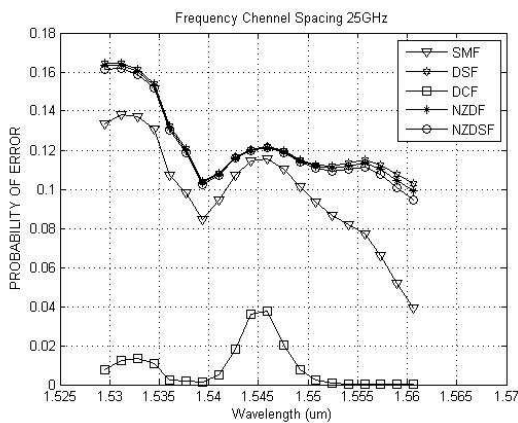
ความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM เป็นตัววัดค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากปรากฏการณ์ FWM ว่ามีปริมาณที่มากน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับค่ากำลังของสัญญาณแสงด้านอินพุต ผลลัพธ์ของความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจาก FWM นั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่ากำลังของ FWM เมื่อทำการเปรียบเทียบความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจาก FWM ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสง 5 ชนิด ได้ผลดังรูปที่ 10



ก



ข



ค

รูปที่ 10 ความแตกต่างของความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ก) ระยะห่างความถี่ 100GHz, ข) ระยะห่างความถี่ 50GHz และ ค) ระยะห่างความถี่ 25GHz

จากการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจาก FWM เห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณมีค่าที่ลดลง จะทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM มีค่าเพิ่มขึ้น (ยิ่งกำลังของ FWM ยิ่งมาก จะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาดมากขึ้น) แสดงว่ากำลังของ FWM มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกำลังอินพุต และจะเห็นว่าเส้นใยแก้วชนิด DCF นั้นมีค่าความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจาก FWM น้อยสุด ตามมาด้วยเส้นใยแก้วชนิด SMF, NZDSF, NZDF และ DSF ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อกำลังของ FWM มีค่ามาก จะทำให้ค่า SNR มีค่าน้อย และเมื่อค่า SNR มีค่าน้อยจะทำให้ค่าความน่าจะเป็นมีค่ามาก และในทางตรงกันข้ามก็เช่นเดียวกัน (ดูสมการที่ (7), (8))

ดังนั้นการที่เราจะใช้งานระบบส่งสัญญาณ DWDM ที่ต้องการให้เกิดผลกระทบจาก FWM นั้นมีค่าที่ยอมรับได้ เราต้องคำนึงถึงตัวแปรที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น เพื่อนำไปพิจารณาการลดผลกระทบของการเกิดปรากฏการณ์ FWM ได้ ทำให้เครือข่ายที่มีสมรรถนะสูงขึ้น คือมีอัตราบิดเบือนต่ำ, ส่งกำลังสัญญาณได้สูงขึ้น และมีระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงไกลมากขึ้น

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาผลกระทบ FWM และ SBS ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วทั้ง 5 ชนิดนั้นจะสรุปได้ว่าเส้นใยแก้วชนิด DCF เกิดผลกระทบจาก FWM น้อยสุด แต่มีค่ากำลังเทรชโฮลด์ของ SBS ที่น้อย จึงทำให้ส่งได้ระยะทางที่ใกล้กว่าเส้นใยแก้วชนิดอื่นๆ (Shamim et al., 2005) ถ้าในการออกแบบสามารถที่จะเพิ่มพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของ DCF ได้นั้น จะสามารถลดผลกระทบของ FWM และ SBS ลงได้ และสามารถส่งกำลังได้ในระยะทางที่ไกลขึ้นอีกด้วย ในการออกแบบต้องคำนึงถึงค่าผลต่างของดัชนีหักเห (Δ) ถ้าผลต่างของดัชนีหักเหมีค่าที่ลดลงจะสามารถเพิ่มรัศมีของคอร์ได้มากขึ้น แต่มากที่สุดได้ไม่เกิน $V < 2.405$ สาเหตุที่เส้นใยแก้วชนิด SMF, NZDF, NZDSF นั้นเกิดผลกระทบจาก FWM ที่สูงกว่าเส้นใยแก้วชนิด DCF นั้น เพราะมีค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันต่ำกว่าเส้นใยแก้วชนิด DCF และเส้นใยแก้วชนิด DSF จะเกิดผลกระทบจาก FWM สูงสุด เพราะค่าโครมาติกดิสเพอร์ชันมีค่าเท่ากับ 0 (เมื่อค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 0 จะทำให้ความแตกต่างของการแพร่กระจายคลื่น ($\Delta\beta$) มีค่าน้อย เมื่อความแตกต่างของการแพร่กระจายคลื่นมีค่าน้อย จะทำให้ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM (η_{ijk}) มีค่าที่สูง จะทำให้กำลังของ FWM มีค่าที่สูง)

เอกสารอ้างอิง

- Govind. P.Agrawal., "Fiber Optic Communication Systems", 3rd edition, John Wiley & Sons, 2002.
- Guanshi Qin. and Hideyuki Sotobayashi, "Stimulated Brillouin Scattering in a Single-Mode Tellurite Fiber for Amplification, Lasing, and Slow Light Generation" *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, No. 5, MARCH 1, 2008 pp. 492-498.

- Rajiv Ramaswami. and Kumar N. Sivarajan. (2002).
“Optical Networks: A Practical Perspective”, 2nd ed., Academic Press,
2002.
- Shamim Shahriar Hossain. and Alan Couchman.,
“DESIGN OF SINGLE MODE SMF, NZ-
DSF AND DCF OPTICAL FIBERS.”
IEEE CCECE/CCGEI, Saskatoon, May
2005.
- Shuxian Song. Christopher T. Allen. and Kenneth R.
Demarest, and Rongqing Hui, “Intensity
Dependent Phase-Matching Effects on
Four-Wave Mixing in Optical Fibers.”
Journal of Lightwave Technology, Vol. 17,
No. 11, November 1999, pp. 2285-2290.
- Tan Saw Chin. F.M. Abbou. and Ewe Hong Tat.,
“Impact of Four Wave Mixing (FWM) in
Routing And Wavelength Assignment”
American Journal of Applied Sciences 5
(8): 1059-1063, 2008.
- Zhang L. and Tang J., “Label-switching architecture
for IP traffic over WDM networks.” IEEE
Proc. - Commun., Vol. 147, No. 5, Oct.
2000, pp. 269-276.