

EFEITOS DA POLARIZAÇÃO NA EFICIÊNCIA DA MISTURA DE QUATRO ONDAS (FWM) SOBRE FIBRAS DS EM SISTEMAS DWDM

Henrique M. B. de Carvalho
Consultor/Instrutor da Fundação CPqD
Campinas, SP, hc14@terra.com.br

Sumário

Este trabalho descreve o estudo do comportamento da eficiência do efeito não linear (ENL) conhecido por Mistura de Quatro Ondas (*Four-Wave Mixing* - FWM) em sistemas DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) com canais igualmente espaçados e fibras monomodo de dispersão deslocada (*Dispersion Shifted* - DS) em função das diferentes combinações do estado-de-polarização (*State-Of-Polarization* - SOP) dos canais. Simulações numéricas e alguns resultados de experimentos laboratoriais mostram boa concordância entre si. Resultados de simulações sistêmicas são apresentados e discutidos.

Quando portadoras ópticas de alta potência (maior que 10 dBm) são lançadas em fibras DS longas (acima de 15 km) surgem os produtos de intermodulação pelo processo FWM. A presença deste efeito degrada o desempenho de sistemas DWDM e esforços vêm sendo realizados no sentido de se utilizar técnicas que aliviem estas degradações.

A aplicação do método sugerido de combinações do SOP dos canais, para a redução da potência da luz FWM em fibras DS, melhora o desempenho do sistema óptico testado, 8 x 10 Gbps, cujos resultados, em termos do fator Q foram melhores que 8,5 ou em termos do BER melhores que 6×10^{-13} , para uma potência em cada canal de 0 dBm lançada sobre 65 km.

Introdução

O advento das comunicações por fibras ópticas tem sido um estímulo bastante intenso para o desenvolvimento mundial das pesquisas e aplicações dos efeitos não lineares durante a década de 80 e 90, sendo muito destes esforços dirigidos para a busca de novos materiais. Verificou-se, também neste período, que as fibras ópticas exibiam propriedades ópticas não lineares a despeito do seu coeficiente não linear ser muito pequeno, quando comparado com os outros materiais não lineares convencionais. A combinação do baixo coeficiente de atenuação, do comprimento longo, dos altos níveis de potência e a alta coerência dos diodos laser, indica, certamente, que os efeitos não lineares determinarão as limitações sistêmicas. A coerência espacial e temporal de uma fonte de luz é fundamental para o estudo do efeito do FWM (ou 4-fótons) em fibras ópticas.

Observou-se que os ENLs seriam fatores fortemente limitantes para o aumento tanto da distância quanto da taxa de transmissão, o que levou a um intenso esforço de pesquisa no sentido de melhorar as características das fibras, do transmissor e do receptor.

A combinação da técnica DWDM com a amplificação óptica aumentou significativamente o esforço de pesquisa, em vários laboratórios, para avaliar a degradação sistêmica sob a ação dos diferentes ENLs, sendo o efeito FWM o de maior impacto negativo.¹

Polarização e Índice Não Linear

Fibras ópticas, como qualquer meio dielétrico, tornam-se não lineares quando campos ópticos de alta intensidade interagem com os seus átomos, dando origem a movimentos anarmônicos dos elétrons ligados, sob a influência destes campos, os quais deslocando-se de suas posições originais produzem dipolos elétricos com polarização induzida P (resposta do material) não-linear. Como exemplo, os campos coulombianos atômicos são, aproximadamente, 10^8 V/cm, enquanto que um laser focalizado é cerca de 10^6 V/cm.

No caso das fibras ópticas, a faixa de comprimentos de onda de interesse para o estudo dos ENLs está entre 0,5 e 2 μm , e a relação fenomenológica usada para relacionar P e E distante da ressonância do meio, é feita através do tensor susceptibilidade elétrica deste meio.

A maioria dos ENLs em fibras ópticas tem sua origem na variação da refração não linear n_2 com a intensidade, como uma resultante do tensor $\chi^{(3)}$. O valor de n_2^1 para a sílica fundida, usada nas fibras ópticas, é 3×10^{-20} m²/W (em unidades MKS) e para vidros calcogenídeos pode chegar a $4,2 \times 10^{-18}$ m²/W. A origem de n_2 nos vidros, tais como a sílica, é devida principalmente à resposta não linear do movimento eletrônico, o qual responde muito rapidamente, na ordem de femtossegundos.

Mistura de Quatro Ondas

O efeito FWM é um caso especial de não linearidade que ocorre dentro do núcleo da fibra monomodo. Neste efeito, dois ou mais feixes de diferentes frequências interagem com um meio dielétrico *passivo*, gerando um conjunto de novas frequências. A descrição deste efeito é bastante complexa e de grande importância, primeiro porque os coeficientes de susceptibilidade relativos ao fenômeno são elementos de tensor, dependentes em frequência, sensíveis à direção dos campos ópticos em relação aos eixos do cristal, e, segundo, que ele pode se tornar uma grande fonte de diafonia não linear, sempre que o espaçamento entre os canais (Δf) e a dispersão cromática (D_c) forem suficientemente pequenos para satisfazer a condição de casamento de fase (PMC). Observa-se, num sistema DWDM, um impacto severo para $\Delta f < 100$ GHz quando combinado com o uso de fibras DS.^{2,3}

A técnica DWDM sobre fibras ópticas permite que N canais sejam simultaneamente modulados em taxas elevadas (10 Gbps) de modo a oferecer uma taxa agregada de $N \times B$ nesta fibra. Para que possamos tirar proveito do baixo coeficiente de atenuação na região de 1550 nm, usamos fibras DS com pequena D_c ($\approx 0,1$ ps/nm.km). Com o advento dos amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier* - EDFA) tornou-se possível desenvolver sistemas de transmissão para longas distâncias entre repetidores (≈ 100 km). Exemplificando, podemos ter sistemas DWDM com $8 \times 2,5$ Gbps operando com

potências em torno de 10 dBm em cada canal, desigualmente espaçados, em distâncias até 160 km, com pré-amplificador^{4,5} sobre fibras DS ! Porém, um preço deve ser pago pelo uso das técnicas DWDM+EDFA+DSF, que é o surgimento de novas frequências ou produtos de intermodulação devido à presença do ENL mais significativo, o FWM.⁶

A investigação da degradação pela presença das novas frequências geradas por FWM, sobre sistemas DWDM com fibras DS, implica no estudo mais aprofundado com respeito ao descasamento de fase.

Num sistema de transmissão fornecendo três ondas (canais) ópticas com frequências f_i , f_j e f_k , o processo de FWM gerará dentro da fibra *doze* novas frequências segundo a expressão $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$ ^{7,8}

Para 16 e 32 canais, serão 3600 e 30752 produtos FWM. A Figura 1 mostra estas novas frequências FWM geradas.

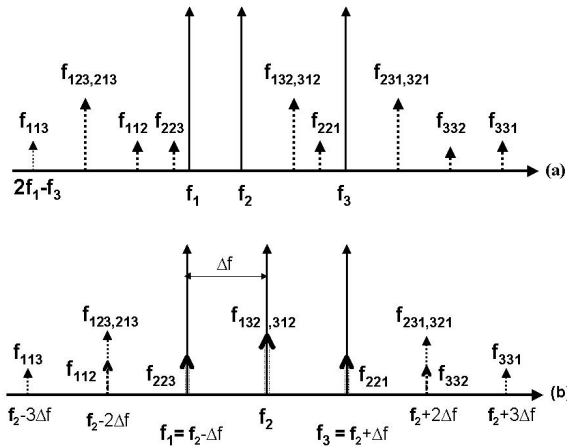


Figura 1 Espectro de geração de 9 novas frequências a partir de 3 frequências originais através do processo de FWM. (a) canais desigualmente espaçados. (b) canais igualmente espaçados com respeito a f_3-f_2 e f_2-f_1 .

A potência óptica média gerada (P_{ijk}) através do efeito FWM, em cada novo componente f_{ijk} , pode ser calculada por

$$P_{FWM} = \eta \cdot \left(\frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} \right) \left(d_{ijk} \cdot \chi_{1111} \right)^2 \left(\frac{L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 \times P_1(0) \cdot P_j(0) \cdot P_k(0) \cdot e^{-\alpha L}$$

onde o primeiro parenteses indica a *intensidade*, κ , de interação não linear, $P_i(0)$, $P_j(0)$ e $P_k(0)$ são as potências dos canais, P_{FWM} é a potência das harmônicas, α é o coeficiente de atenuação, χ_{1111} é o tensor susceptibilidade de terceira ordem, n é o índice de refração do núcleo, A_{eff} é a área efetiva do núcleo para a propagação do modo HE_{11} , L_{eff} o comprimento efetivo não linear, η é a eficiência de geração do FWM e d_{ijk} o fator de degenerescência, o qual pode ser selecionado entre 1, 3 e 6.

A eficiência dos sinais interferentes, com respeito ao descasamento de fase $\phi_m = \Delta\beta \cdot L$ (*phase mismatching*), pode ser

obtida através da razão entre a potência dos canais na entrada da fibra ($z = 0$) e a potência na saída ($z = L$) e expressa por

$$\eta_{ijk} = \frac{P_{ijk}(L, \Delta\beta)}{P_{ijk}(L, \Delta\beta = 0)} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left[1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2\left(\frac{\Delta\beta L}{2}\right)}{\left(1 - e^{-\alpha L}\right)^2} \right]$$

onde a eficiência é máxima ($\eta=100\%$) quando a PMC é satisfeita (quando a diferença entre as constantes de propagação é nula ou $\Delta\beta = \beta_i + \beta_j - \beta_k - \beta_{ijk} = 0$). A eficiência η depende, basicamente, da separação entre canais Δf , da potência lançada, do comprimento efetivo não linear L_{eff} , da área efetiva A_{eff} e da D_C da fibra.

Existem, atualmente, 6 técnicas, bastante utilizadas, para minimizar a P_{FWM} , a saber: compensação passiva de dispersão, espaçamento desigual entre canais, aumento do espaçamento entre canais, diminuição da potência lançada, novos projetos de fibras e espaçamento desigual+controle da polarização. Neste trabalho abordaremos uma sétima técnica: combinação do estado-de-polarização de cada canal.

Redução da P_{FWM} combinando SOPs

Estritamente falando, uma fibra “monomodo” comum, axialmente simétrica, é de fato *bimodal*, isto é, a luz ao se propagar apresenta dois modos fundamentais (HE_{11} : HE^x e HE^y) aproximadamente degenerados (pequena diferença entre suas constantes de propagação) e com polarização ortogonal. Os eixos principais x e y são determinados por elementos de simetria da seção transversal do núcleo e uma diferença Δn dos índices de refração surge das polarizações em cada eixo. O estado-de-polarização (*State-Of-Polarization* - SOP) apresenta uma clara relação entre a sua evolução e os efeitos não lineares, através da PMC dos dois modos ortogonais da luz propagante, ao longo do núcleo, de uma fibra monomodo.⁹

Instabilidades do SOP surgem quando existem perturbações geométricas na fibra, e são conhecidas por Dispersão do Modo de Polarização (*Polarization Mode Dispersion* - PMD). A PMD de uma fibra óptica é comumente caracterizada pelo atraso de grupo diferencial médio $\langle \Delta\tau \rangle$ (*Mean Differential Group Delay* - DGD) ou pelo coeficiente $D_p = \langle \Delta\tau \rangle / \sqrt{L}$. Os fatores que dão

origem à PMD em fibras monomodo são: a birrefringência intrínseca, o acoplamento aleatório dos modos de polarização e componentes como filtros, acopladores, etc..¹⁰

As fibras reais apresentam uma ligeira elipsidade residual do núcleo, de modo que os dois modos ortogonais de polarização “vêm” diferentes tamanhos de núcleos e, conseqüentemente, também apresentarão diferença entre as constantes de propagação e o controle rigoroso, durante o processo de fabricação da fibra, reduz, as assimetrias dos parâmetros geométricos da casca e do núcleo, garantindo, assim uma baixa *birrefringência*.

Para a análise teórica da dependência da eficiência de FWM

com os estados gerais de polarização (SOP), foi usado o modelo de Inoue, e algumas condições de contorno, onde a polarização da luz propagante, pelos vários segmentos de fibra, birrefringentes, foi assumida ser elíptica (caso mais geral), enquanto que para as simulações utilizadas neste trabalho, o SOP adotado foi linear.¹¹

Simulação da Redução da Eficiência de FWM pelas Combinações do SOP

Neste trabalho, usamos a ferramenta LightD, desenvolvida pela Fundação CPqD. Simulamos o comportamento sistêmico, na presença dos efeitos lineares e não lineares, variando os valores dos parâmetros de interesse tais como: comprimentos de onda, potências ópticas, ângulos de polarização e coeficiente de PMD. Os resultados, deste trabalho, estão em acordo com os experimentos que utilizaram luz linearmente polarizada, onde as reduções, R_{FWM} , obtidas, das potências dos produtos de intermodulação, são da ordem de 10 dB, quando os canais estão com SOPs alternados e ortogonais entre si.

Em condições reais, de campo, os SOPs sofrem flutuações, da birrefringência, ao longo da fibra cabeada, devido a perturbações do meio ambiente e da própria construção do cabo. Tais flutuações são de baixa frequência ao longo do tempo, como já foi verificado experimentalmente, porém, à medida que as taxas de transmissão aumentam, acima de 10 Gbps, estas variações vão se tornando mais e mais significativas.

A Fig.2 mostra, uma típica distribuição de frequências para três canais e suas harmônicas, f_{113} e f_{331} , escolhidas entre as 12 novas frequências geradas pelo batimento das frequências originais no processo de FWM. Os valores das frequências de FWM foram calculados segundo as expressões ao lado do gráfico e estão indicados abaixo de suas posições no eixo x.

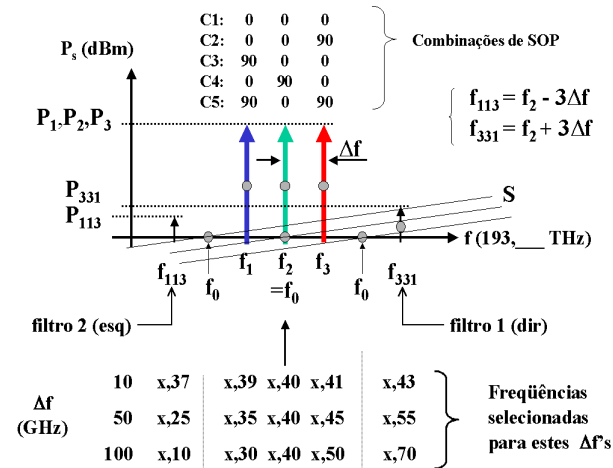


Figura 2 Espectro de frequências para 3 canais e apenas dois produtos de FWM. Combinações (C1,C2,C3,C4,C5).

Serão apresentados neste artigo apenas os resultados para sistemas DWDM com 8x10 Gbps, sobre fibras DS, para 4 diferentes combinações do SOP, dos 8 canais propagantes. O objetivo deste exemplo é o de avaliarmos o desempenho sistêmico utilizando o fator Q em função das combinações de SOP dos canais e das potências lançadas na fibra.

A Fig.3 exibe o diagrama em blocos dos canais,

externamente modulados, igualmente espaçados de $\Delta\lambda = 0,8$ nm (99,775 GHz), seqüência de bits $2^6 - 1$, PRBS, com $P_{tot} = 12,43$ e 16,43 dBm (atenuador Att3 em 16 e 20 dB, de modo a manter a $P_{rec} = -17,6$ dBm para um fator $Q \approx 8,46$ na condição “back-to-back” (sem não linearidades), filtro óptico sintonizável, na recepção, com largura de banda de 1,3 nm. Para a fibra DS temos: $A_{eff}=55 \mu m^2$, $L_{eff} = 25$ km, zero local $\lambda_0 = 1547,80$ nm ($f_0 = 193.690$ GHz) e $L_{tot}=105$ a 125 km, dependendo do valor do Att3 e $D_p = 0,1$ ps/km. A paleta utilizada na simulação é flexível no sentido de permitir o acréscimo de canais e de controladores de polarização, bem como, variar e/ou medir todo e qualquer parâmetro de dispositivo.

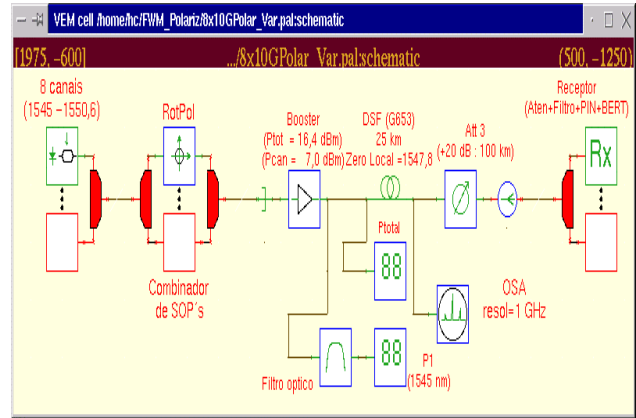


Figura 3 Diagrama completo do sistema de 8x10 Gbps, com recepção e controles de polarização.

A Tab.1 lista as combinações de SOP utilizadas no LightD.

1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0
0	90	0	90	0	90	0	90
90	0	90	0	90	0	90	0
0	0	90	0	90	90	0	90

Tabela 1 Combinações de SOP associadas a cada canal (0: canais paralelos; 90: canais ortogonais).

Resultados de Simulação

O zero local escolhido para foi 1547,8 nm, centrado na banda de transmissão, entre os canais 4 e 5 (4 canais na região de dispersão normal e 4 na região anômala).

A semente, S, do transmissor foi retirada, de modo a permitir a geração de uma seqüência aleatória de bits. Assim, é necessário executar o programa diversas vezes para cada combinação e cada P_{tot} , e, em seguida, escolher os piores valores do fator Q.

Nossos resultados foram comparados com alguns experimentos realizados em outros laboratórios que apresentam seus resultados deste modo. O fator Q tem relevância para medidas laboratoriais com altas taxas e BER reduzido (10^{-12}), o que exige rapidez na obtenção dos resultados. No caso da simulação, esta exigência não se faz necessária e foi utilizada apenas para fins de comparação.

A Fig.4 exibe os resultados das simulações em função das condições previamente definidas. Foram realizados experimentos com vários níveis de potência lançada (9,43/12,43/16,43 dBm)

sobre a fibra e, aqui, serão apresentados os resultados para os casos extremos, ou seja, $P_{\text{tot}} = 9,43$ e $16,43$ dBm, de modo a evidenciar situações críticas de geração de sinais interferentes.

No primeiro caso, com $P_{\text{entr}} = 9,43$ dBm e enlace com 65 km, nota-se claramente a melhoria do sistema quando combinamos o SOP de entrada de um modo alternado. O desempenho sistêmico melhora cerca de três ordens de grandeza (10^{-10} para 10^{-13}) quando escolhemos as combinações C2, C3 ou C4.

No segundo caso, com $P_{\text{entr}} = 16,43$ dBm e enlace com 125 km, nota-se que o sistema apresenta certa instabilidade em seu desempenho, apesar de alguns canais demonstrarem menor degradação com a combinação C2, as quais podem estar associadas à presença de outros efeitos não lineares e ao número reduzido de cálculos dentro desta faixa de potência.

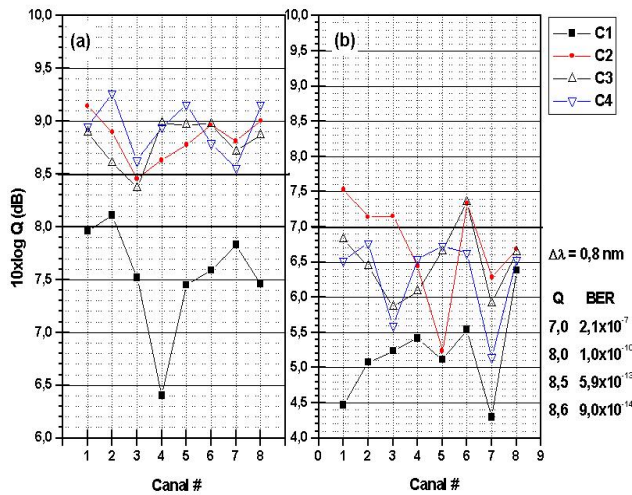


Figura 4 Comparação do desempenho sistêmico, pelo fator Q, com seqüência aleatória de bits (sem semente no transmissor); $\lambda_0 = 1547,8$ nm ($\equiv f_0 = 193,69$ THz); Combinações do SOP: C1, C2, C3, C4.

- (a) $P_{\text{tot}} = 9,43$ dBm ($P_{\text{can}} = 0$ dBm);
- (b) $P_{\text{tot}} = 16,43$ dBm ($P_{\text{can}} = 7$ dBm).

Em vista dos resultados obtidos durante diferentes simulações, testamos uma nova técnica, neste sistema, a qual consiste em incluir um trecho curto (≈ 10 m) de fibra monomodo, com coeficiente $D_p = 1,0$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$, antes do enlace principal, com $D_p \approx 0,1$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$, de modo a reduzir ainda mais as potências das harmônicas geradas por FWM. Os resultados dos testes exibiram uma melhoria, de pelo menos 0,5 dB, no desempenho sistêmico, para a mesma combinação de SOP, quando comparado com o mesmo sistema sem o trecho de 10 m. Serão necessárias novas simulações e aprofundamentos teóricos para explorarmos a viabilidade e a potencialidade desta técnica.

Conclusão

No sistema examinado observamos uma melhora no desempenho de duas a três ordens de grandeza em relação à condição de canais co-polarizados, ao escolhemos combinações de ortogonalidade de SOP para os 8 canais de entrada, dentro das condições pré-estabelecidas e mencionadas.

Outros efeitos não lineares, tais como a MI, a SPM ou a XPM, estão certamente contribuindo, de um modo combinado, para a melhoria ou degradação do desempenho sistêmico. Esta contribuição não foi examinada durante as simulações, contudo há espaço para um estudo mais aprofundado.

Novos trabalhos, teóricos e experimentais, avaliam os impactos da PMD sobre o efeito do FWM em fibras DS.^{12,13}

De acordo com os resultados obtidos, 8x10 Gbps, igualmente espaçados, linearmente polarizados, sobre fibra DS, com forte casamento de fase do canal 2 com o zero local ($f_2 = f_0$), com potência total lançada de até 16,4 dBm, observamos uma melhora de desempenho sistêmico, de duas ordens de grandeza em BER, para combinações de SOP convenientemente escolhidas e comparadas com os canais co-polarizados.

Referências Bibliográficas

- ¹ Carvalho, H.M.B. “Efeitos da Polarização na Mistura de Quatro Ondas (FWM) em Fibras DS”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, FEEC/UNICAMP, C253e, 01/ 2001.
- ² Baldwin, George; *An Introduction to Nonlinear Optics*, Plenum Press, pp. 39-44, 69, 71-84, 99-104, 1969.
- ³ Agrawal, G.; *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd ed., Academic Press, pp. 5, 6, 403-415, 1995.
- ⁴ Carvalho, H. et al.; “On the Transmission of Repeaterless 8x2.5 Gb/s over 160 km of Dispersion Shifted Fiber”, *SBT/IEEE, Int. Telecom. Symposium, Proc.*, vol.2, pp.615-618, 1998.
- ⁵ Carvalho, H. et al.; “Transmissão DWDM de 8 Canais, 2,5 Gbps – 20 Gbps – sobre Fibra de Dispersão Deslocada em Regime de Alta Potência e Longa Distância”, *XIV Seminário de Redes*, Brasília, DF, pp. 370-377, 17-21 Agosto 1998.
- ⁶ Keiser, G.; *Optical Fiber Communications*, McGraw-Hill, pp. 502-532, 2000.
- ⁷ Shibata, N. et al.; “Phase-Mismatch Dependence of Efficiency of Wave Generation Through Four-Wave Mixing in a Single-Mode Optical Fiber”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, pp. 1205-1210, 1987.
- ⁸ Chralyvy, A.; “Limitations on Lightwave Communications Imposed by Optical-Fiber Nonlinearities”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, no.10, pp. 1548-1557, 1990.
- ⁹ Kaminow, Ivan; “Polarization in Optical Fibers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no.1, 15-22, January 1981.
- ¹⁰ Heisman, Fred, “Polarization Mode Dispersion: Fundamentals and Impact on Optical Communication Systems”, *ECOC'98*, pp.53-79, 20-24 Sept 1998.
- ¹¹ Inoue, Kyo; “Polarization Effect on Four-Wave Mixing Efficiency in a Single-Mode Fiber”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, no.4, pp. 883-894, April 1992.
- ¹² Song, S., “The impact of polarization-mode dispersion on four-wave mixing in WDM systems”, *OFC 2000, ThA7-1*.
- ¹³ Sunnerud, H. et al., “Impact of PMD on FWM Crosstalk in WDM Systems”, *OFC 2000*.