

Caracterização da Mistura de Quatro Ondas em diferentes Amplificadores Ópticos a Semicondutor Visando Aplicação em Fontes de Supercanais

Cristiane B. F. Adami, Andrea M. Felix e Aldálio C. Bordonalli

Resumo—Este artigo apresenta resultados experimentais do efeito da mistura de quatro ondas em amplificadores ópticos a semicondutor com diferentes comprimentos da cavidade, visando posterior aplicação em fontes de supercanais. Observou-se como o número de linhas geradas e suas amplitudes em relação ao nível de ruído de emissão espontânea do dispositivo são influenciados pela variação de potência das portadoras ópticas e da distância espectral entre elas. Para um espaçamento da ordem de 0,2 nm, uma das estruturas analisadas foi capaz de gerar 13 harmônicas.

Palavras-Chave—Óptica não linear, mistura de quatro ondas, amplificador óptico a semicondutor, supercanais.

Abstract—An experimental analysis of four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers of different cavity lengths is presented. The non-linear process efficiency was observed in terms of the number of generated lines and their relative amplitude to the amplified spontaneous emission level as power and spectral separation of the input optical carriers was varied. The best results were obtained for a 0.2-nm spectral distance, for which one of the structures was able to generate 13 harmonics.

Keywords—Semiconductor optical amplifiers, nonlinear optics, four-wave mixing, frequency comb generator.

I. INTRODUÇÃO

A demanda incessante pelo aumento da capacidade das redes de comunicações ópticas nos dias de hoje, para suprir o forte crescimento do tráfego IP de mais de 50% ao ano [1], tem impulsionado o uso de sistemas de transmissão óptica com taxas cada vez mais altas, superiores a 100 Gb/s por canal. Neste contexto, o uso de supercanais [2-4] com formatos de modulação de alta eficiência espectral e recepção coerente tem aparecido como uma opção de transmissão de alta capacidade. Para a formação de supercanais, são necessárias técnicas eficientes de geração de pentes ópticos de frequência (OFCG – *optical frequency comb generator*) no transmissor e até no receptor [4]. Dentre as várias técnicas existentes, podem-se destacar, por exemplo, a cascata de moduladores Mach-Zehnder [5-6], o laço de recirculação a fibra [7-8] e o laser de modo discreto alimentado por uma onda senoidal [9].

Em comum, as técnicas descritas se utilizam de propriedades de seus elementos, como, por exemplo, a não

Cristiane B. F. Adami, Andrea M. Felix e Aldálio C. Bordonalli, Departamento de Comunicações, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil; e-mails: cris_branfer@hotmail.com, andrea.felix@ig.com.br, aldario@ecom.fee.unicamp.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo convênio Padtec/UNICAMP "Redes e Transceptores Ópticos Emergentes", pela CAPES e pelo CNPq (308533/2010-1).

linearidade em fibras, no caso de laços de recirculação, e o efeito eletro-óptico, no caso do cascateamento de moduladores, para a ampliação do número de harmônicas além da portadora semente que serve de fonte para o sistema. Em particular, o efeito da mistura de quatro-ondas (FWM – *four-wave mixing*) se mostra eficiente nesse tipo de processo [7-8]. Além da fibra óptica, outros componentes podem apresentar esse efeito não linear. Baseado em trabalhos anteriores [10], observou-se que o amplificador óptico a semicondutor (SOA – *semiconductor optical amplifier*) possui a capacidade de gerar harmônicas por meio do efeito da FWM e, dependendo da estrutura do mesmo, o número de harmônicas geradas é maior ou menor [11]. Dessa forma, o SOA apresenta potencial para aplicação em OFCGs, permitindo a compactação de montagens experimentais [7].

Neste contexto, este artigo analisa a FWM em SOAs e apresenta dados experimentais de caracterização desse processo não linear para três amplificadores com diferentes comprimentos da cavidade. Nesse caso, avalia-se a influência que a variação de potência das portadoras ópticas de entrada e do espaçamento espectral entre elas têm na eficiência da geração da FWM. Diferentemente dos trabalhos [11] e [12], o objetivo da análise foi de trazer o espaçamento entre as portadoras o mais próximo possível, com o objetivo de atender os requisitos atuais para a geração de supercanais, analisando-se a eficiência da FWM inclusive para espaçamentos menores que 0,5 nm. Dentre os SOAs avaliados, utilizou-se um SOA convencional com cavidade de 0,65 mm, um SOA não linear de 2 mm de comprimento de cavidade e, por último, um SOA ultra longo de 8 mm (comportamento não linear mais acentuado). Por fim, uma comparação de desempenho entre os SOAs é feita, no intuito de se verificar qual deles apresenta melhor eficiência e custo-benefício na geração de harmônicas, visando futuras aplicações em OFCGs.

II. MONTAGEM EXPERIMENTAL

O diagrama da montagem experimental usada para avaliar a eficiência da geração de harmônicas por FWM em três SOAs de diferentes estruturas é mostrado na Fig. 1. Para a geração da FWM nos SOAs, foram necessários dois lasers (Laser 1 e Laser 2), cujos sinais (portadoras) foram combinados por meio de um acoplador direcional de 3 dB. Uma amostra do sinal resultante dessa combinação foi acoplada ao SOA sob teste. Dois controladores de polarização (CP_1 e CP_2) foram usados para casar as polarizações dos sinais de entrada do SOA. Os isoladores (ISO_1 e ISO_2) evitavam o retorno de sinais indesejados aos componentes ópticos ativos.

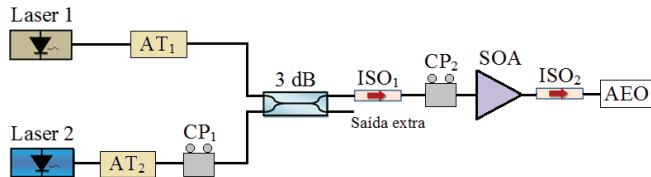


Fig. 1. Diagrama esquemático da montagem experimental.

Os atenuadores (AT_1 e AT_2) foram responsáveis por controlar as potências ópticas dos sinais dos lasers antes do acoplamento ao SOA. Após o SOA, os sinais foram observados em um analisador de espectro óptico (AEO, Agilent 86146B), que permitiu o armazenamento dos dados via interface com um computador. O aparato experimental foi utilizado em ambiente controlado, sendo capaz de manter os ajustes de polarização durante as medições. Três tipos de SOAs foram avaliados. O primeiro deles (SOA 1), chamado de convencional, tem como propósito principal a amplificação óptica (InPhenix IPSAD1503) e cavidade de 0,65 mm. Já o segundo SOA (SOA 2), classificado como não linear, possui cavidade de 2 mm de comprimento (CIP NL-OEC-1550). Por fim, um SOA ultra longo de 8 mm (SOA 3), de baixa potência de saturação e não linearidade mais acentuada (Fraunhofer-HHI), foi avaliado.

A Fig. 2 mostra um exemplo de espectro típico na saída do SOA, resultante da passagem dos sinais pelo dispositivo em níveis de potência que induzem o aparecimento da FWM. Nesse caso, AT_1 e AT_2 foram ajustados para que λ_1 e λ_2 estivessem equalizadas na saída do SOA 3. Como pode ser observado, há a formação de várias harmônicas (canais) por FWM, designadas por $FWM+i$ e $FWM-i$ dependendo de sua localização em relação às portadoras ("+" ou "-" para canais com comprimento de onda maior ou menor que ambos λ_1 e λ_2 , respectivamente), com i inteiro. Destaca-se, também, na Fig. 2, uma das formas adotada de se avaliar a eficiência da FWM: a medida da amplitude das harmônicas em relação ao nível do ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *amplified spontaneous emission*) do SOA, a qual, aqui, foi chamada de relação sinal-ruído óptica (OSNR – *optical signal-to-noise ratio*). Nesse caso, a OSNR foi medida como a razão (em dB) entre a potência de pico da harmônica e o nível extrapolado da ASE no comprimento de onda da harmônica.

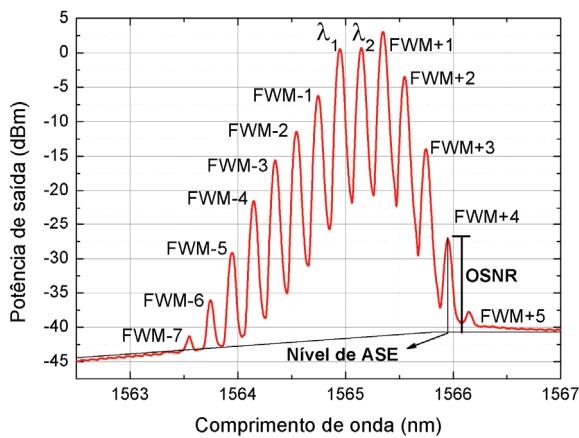


Fig. 2. Espectro na saída do SOA 3 medido no AEO, demonstrando a FWM após o acoplamento de duas portadoras ópticas ao dispositivo.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Para promover a comparação de desempenho entre os três SOAs de diferentes estruturas, primeiro, os comprimentos de onda dos Lasers 1 e 2 foram ajustados para produzir um espaçamento mínimo de 0,2 nm (limitado pela resolução do

AEO disponível). Apesar disso, em 1550 nm, esse espaçamento corresponderia a cerca de 25 GHz, o que estaria na ordem de grandeza das primeiras aplicações com supercanais [3]. Após esse ajuste, a potência óptica das portadoras de entrada (λ_1 e λ_2) foi variada de diferentes formas, sempre partindo-se de uma condição de máxima potência de saída equalizada para as duas portadoras na saída do SOA avaliado. A partir dessa condição, primeiramente, variou-se apenas a atenuação em AT_2 da Fig. 1, mantendo-se AT_1 fixo, ou seja, sem inserir atenuação à portadora λ_1 . Depois, realizou-se o processo inverso, variando somente a atenuação em AT_1 e mantendo o valor de AT_2 . Por fim, variaram-se os valores de atenuação simultaneamente no terceiro caso, de maneira que as portadoras na saída do SOA estivessem sempre equalizadas.

Na sequência, o espaçamento entre as portadoras de entrada ($\Delta\lambda$) era alterado e os mesmos procedimentos de variação de potência repetidos para cada espaçamento adotado. Durante estes procedimentos, mediram-se as OSNRs das harmônicas geradas por FWM, bem como as variações de potência na saída do SOA da portadora que estava sendo atenuada. Devido à quantidade muito grande de medidas, os resultados mostrados aqui são os mais relevantes do ponto de vista da comparação entre as três estruturas para aplicação em OFCGs. Dessa forma, a maioria dos resultados da FWM para variações distintas de potência da(s) portadora(s) (λ_1 e/ou λ_2) considera $\Delta\lambda = 0,2$ nm. A influência de $\Delta\lambda$ é contemplada apenas em situações quando há equalização da potência de saída das portadoras.

Durante os experimentos com os SOAs 1 e 2, cujos espectros de ASE, para as correntes de polarização utilizadas, estão centrados ao redor de 1545 e 1557 nm, respectivamente, o Laser 1 foi um de realimentação distribuída (DFB – *distributed feedback*, JDSU), polarizado a 53 mA, o que resultou em uma potência óptica de saída de 8,43 dBm e um comprimento de onda por volta de 1547,8 nm. O Laser 2 foi um laser sintonizável em cavidade externa (LSCE, Santec TSL-210V) que operou com uma potência óptica de saída de 10 dBm e seu comprimento de onda variado em até +3 nm a partir de 1548 nm. Considerando as perdas de inserção dos dispositivos, as potências máximas das portadoras na entrada dos SOAs 1 e 2 foram de 1,8 (λ_1) e 2,4 dBm (λ_2). Esses valores geraram a condição inicial para as medições, ou seja, de portadoras equalizadas nas saídas dos SOAs, polarizados com uma corrente de 240 mA. No caso do SOA 3, devido a seu espectro de ASE ser centrado em torno de 1565 nm, houve a necessidade de se substituir o laser DFB (Laser 1) por um segundo laser sintonizável em cavidade externa (Santec MLS-2100), que foi ajustado para operar no comprimento de onda de 1565 nm e potência óptica de saída de 5 dBm. O Laser 2 permaneceu o mesmo, porém, foi centrado em 1565,2 nm, com variação de até +2 nm, com potência óptica de saída de 10 dBm. Com a troca do Laser 1, as potências na entrada do SOA 3 foram de, aproximadamente, -3,9 (λ_1) e 1,0 dBm (λ_2), as quais asseguraram a condição de portadoras equalizadas na saída do dispositivo. Para isso, uma vez que o SOA 3 possuía uma cavidade dividida em 4 seções (duas seções de 1 mm e duas de 3 mm), o mesmo foi polarizado com uma corrente total de 1,2 A, distribuída nas quatro seções do dispositivo ($I_1 = I_4 = 150$ mA para 1 mm, $I_2 = I_3 = 450$ mA para 3 mm).

Para as condições iniciais adotadas, observou-se um máximo de 5 canais FWM (três do lado esquerdo e dois do direito das portadoras) para o SOA 1. A Fig. 3 mostra a OSNR de diferentes harmônicas da FWM produzidas pelo SOA 1 em função da potência de saída da portadora λ_2 (maior comprimento de onda), quando a potência do Laser 2 é

atenuada em AT_2 . Nesse caso, sem a variação em AT_2 , a potência de saída inicial para λ_2 é de 7,0 dBm. Observa-se que, quando a potência da portadora λ_2 cai abaixo de -9 dBm (o que significa uma atenuação do Laser 2 de 18,4 dB), FWM-1 é a única harmônica detectável a partir do espectro de saída do SOA 1. Nesse caso, as amplitudes das demais harmônicas se encontravam abaixo do nível de ASE do amplificador. Além disso, FWM-1 sempre apresentou uma melhor OSNR se comparada às dos outros canais FWM, inclusive FWM+1. Por outro lado, uma vez que a portadora λ_2 fornece menor energia ao processo não linear, observou-se que as harmônicas geradas ao lado da mesma (+) apresentaram uma pior relação sinal-ruído óptica em relação a suas contrapartes. Isso se evidencia pelo fato da terceira harmônica apenas ser detectável do lado esquerdo do espectro (-) para as condições iniciais adotadas. O gráfico também mostra a convergência do valor de FWM+1 para o de FWM-1 para altos valores de potência de entrada. Já a Fig. 4 apresenta a OSNR de diferentes harmônicas da FWM produzidas pelo dispositivo em função da potência de saída da portadora λ_1 , quando a potência do Laser 1 é atenuada em AT_1 .

Nesse caso, a condição inicial da potência de λ_1 na saída do SOA 1 foi de 7,65 dBm. A Fig. 4 mostra que, para uma potência da portadora λ_1 na saída do SOA de cerca de 4 dBm, os canais FWM-1 e FWM+1 atingem o mesmo nível de potência e apresentam uma OSNR de, aproximadamente, 29 dB. Um comportamento semelhante ocorre para os canais FWM-2 e FWM+2, onde, quando a portadora λ_1 está em torno de -1 dBm, ambos alcançam uma OSNR de cerca de 4 dB. Esse comportamento sugere que, de acordo com o que se observa nas Fig. 3 e 4, as harmônicas ao lado da portadora sofrendo atenuação apresentam uma redução mais acentuada de potência em comparação à harmônica próxima à outra portadora. O fato de haver um cruzamento nos valores da OSNR da Fig. 4 sugere que, para as condições iniciais utilizadas, as harmônicas à esquerda das portadoras tendem a ser privilegiadas em termos de potência nas trocas de energia durante o processo não linear, como observado em [10-11].

Por fim, a Fig. 5 mostra a OSNR das harmônicas da FWM produzidas pelo dispositivo em função da potência de saída equalizada das portadoras, quando as potências do Laser 1 e do Laser 2 são adequadamente atenuadas em AT_1 e AT_2 , respectivamente. Notar que as harmônicas geradas à esquerda de λ_1 (canais com comprimentos de onda menores que os de λ_1 e λ_2) apresentam uma OSNR maior que a dos canais gerados à direita (canais com comprimento de onda superior aos das portadoras λ_1 e λ_2), praticamente mantendo-se a diferença entre FWM-1 e FWM+1 que é observada para as condições iniciais de medição. Além disso, a OSNR cai com a potência das portadoras de entrada de forma bem mais acentuada que nos casos anteriores, tornando-se indetectáveis os produtos da FWM para as potências das portadoras menores que 3 dBm.

Considerando-se, agora, a variação do espaçamento entre as portadoras 1 e 2, a Fig. 6 mostra o comportamento da OSNR dos produtos da FWM em função do espaçamento entre as portadoras, adotando-se apenas a condição de máxima potência equalizada na saída do SOA (condição inicial para as medições envolvendo variações de potência). Observa-se que a eficiência de geração de harmônicas pela FWM tende a cair a medida que as portadoras se afastam uma da outra, uma vez que a OSNR não permanece fixa sob essas condições. Do ponto de vista de aplicação em OFCGs, o resultado sugere que, se a taxa de variação se mantiver, podem-se esperar valores de OSNR maiores se o espaçamento for $< 0,2 \text{ nm}$.

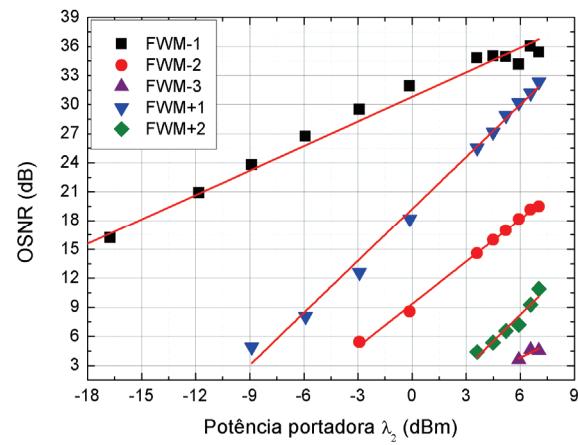


Fig. 3. OSNR das harmônicas geradas por FWM em função da potência de saída da portadora λ_2 , quando a potência do Laser 2 é atenuada em AT_2 .

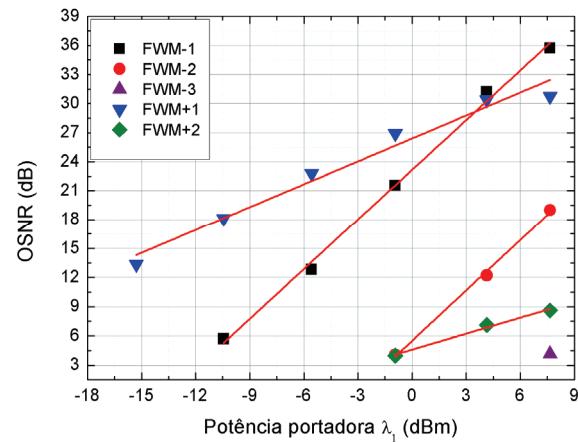


Fig. 4. OSNR das harmônicas geradas por FWM em função da potência de saída da portadora λ_1 , quando a potência do Laser 1 é atenuada em AT_1 .

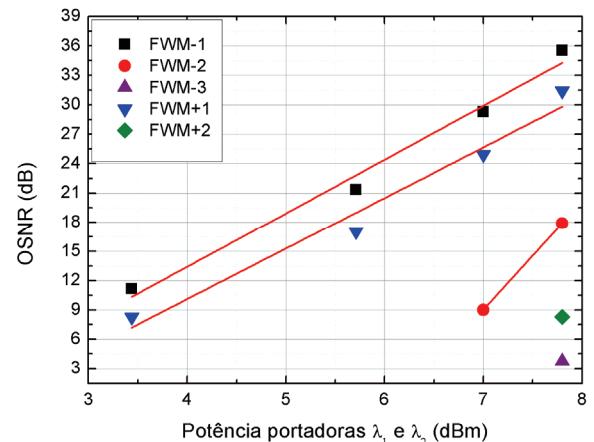


Fig. 5. OSNR das harmônicas geradas por FWM em função da potência das duas portadoras λ_1 e λ_2 , para o SOA 1.

Na caracterização da FWM para o SOA 2, as condições iniciais de medição adotadas geraram um máximo observável de 7 canais FWM (quatro do lado esquerdo e três do direito das portadoras). Dessa forma, tem-se um ganho de duas linhas com a utilização de um SOA com cavidade mais longa que a do SOA 1. Por outro lado, no que tange a avaliação da OSNR para diferentes cenários de potência das portadoras (λ_1 e λ_2 atenuadas individualmente ou simultaneamente), observou-se um comportamento muito semelhante ao apresentado pelo SOA 1 nas Fig. 3 a 5. Assim, os resultados mais relevantes se mostraram aqueles que tratam da OSNR dos canais gerados no

SOA 2 para a variação do espaçamento entre as portadoras. Assim, Fig. 7 apresenta a OSNR dos produtos FWM do SOA 2 em função do espaçamento entre portadoras equalizadas em máxima potência. De uma forma geral, a OSNR desses canais é maior que a dos canais gerados no SOA 1 (Fig. 6), e harmônicas de ordem superior continuam visíveis (FWM-3 e FWM+2) mesmo para espaçamentos maiores que 0,2 nm. Pelo número maior de linhas e melhor OSNR, o SOA 2 seria mais indicado para aplicações em OFCGs que o SOA 1.

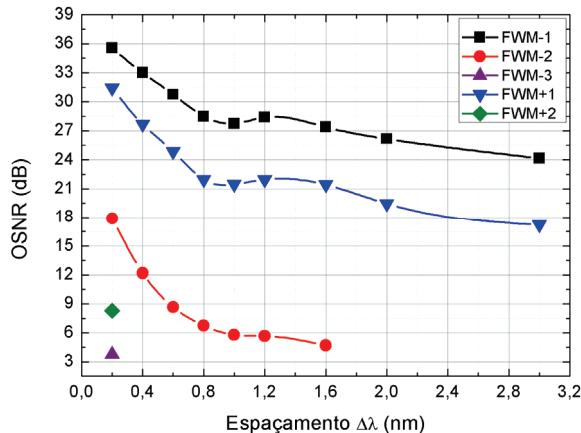


Fig. 6. OSNR dos produtos FWM do SOA 1 em função do espaçamento entre portadoras equalizadas em máxima potência.

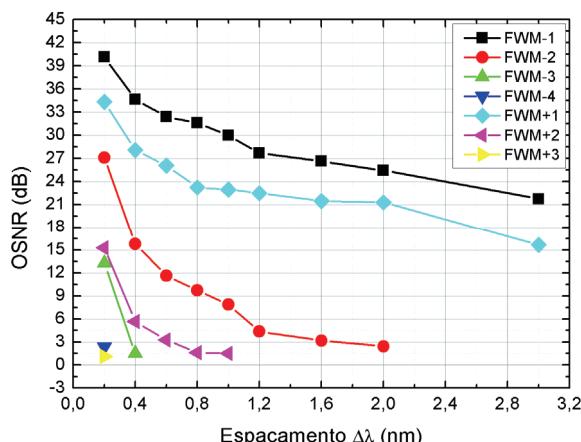


Fig. 7. OSNR dos produtos FWM do SOA 2 em função do espaçamento entre portadoras equalizadas em máxima potência.

Finalmente, analisa-se o SOA 3. Sob as condições iniciais de potências máximas e equalizadas de saída das portadoras, esse dispositivo gerou um total de 13 canais, oito para o lado esquerdo e cinco para o lado direito das portadoras. Contudo, por causa de sua estrutura mais complexa, observou-se que o comportamento da OSNR com os esquemas propostos de variação de potência das portadoras apresentaram resultados bem diferentes daqueles para os SOAs 1 e 2, com oscilações de valores devido à sensibilidade do dispositivo a pequenas alterações em suas condições de entrada. Assim, os dados referentes às variações de potência de λ_1 e/ou λ_2 foram postos em tabelas. Ainda, ressaltar-se que, para permitir a exposição dos resultados, apenas as medidas de OSNR de quatro das harmônicas (FWM-2 a FWM+2) são listadas, apesar do aparecimento de FWM-8 a FWM+5 para altas potências. Para ilustrar a sensibilidade de operação do SOA 3, a Tabela I exibe a OSNR quando a potência de λ_2 é atenuada. Os resultados mostram que, a partir das condições iniciais, há uma forte dependência da FWM com a atenuação individual

dessa portadora. A atenuação da portadora na entrada mudou a resposta do ganho não linear do amplificador, provocando trocas de potências que ocasionaram o aumento da potência da própria portadora em detrimento da perda de potência λ_1 e das harmônicas. Vale ressaltar que, depois dessa região inicial de altíssima potência (acima de 3,18 dBm para λ_2), a OSNR tende a ser semelhante ao observado para os SOAs 1 e 2.

TABELA I. OSNR DAS HARMÔNICAS GERADAS POR FWM NO SOA 3 À MEDIDA QUE A PORTADORA λ_2 É ATENUADA NA ENTRADA.

Potência (dBm)	Relação sinal-ruído óptica (OSNR) (dB)			
Potência saída λ_2	FWM-1	FWM-2	FWM+1	FWM+2
0,86	35,46	30,49	43,71	36,94
-0,39	34,28	30,93	42,82	36,43
-3,51	32,71	30,79	40,73	36,57
-2,09	28,92	31,16	39,47	34,50
0,50	28,92	32,12	38,66	31,89
1,98	31,89	32,78	37,02	29,58
3,24	34,41	32,71	35,09	26,61
3,18	35,39	31,16	32,04	22,00
2,87	35,39	28,40	29,38	17,47
1,91	34,65	25,65	26,09	12,28
0,80	33,08	22,01	22,52	7,65
-0,98	31,38	19,32	18,44	3,64
-2,46	29,90	15,83	14,94	2,07
-3,96	28,10	12,57	11,22	—
-6,03	26,02	8,39	8,32	—
-7,75	24,47	6,84	5,73	—
-9,61	22,60	4,97	4,68	—
-11,83	20,52	4,04	4,18	—
-13,55	18,88	—	3,64	—
-15,25	16,95	—	—	—

A Tabela II apresenta o comportamento da OSNR quando a potência da portadora λ_1 é atenuada. Neste caso, um comportamento similar ao obtido com os outros SOAs ocorre, pois a OSNR, para todas as harmônicas geradas pela FWM, diminui com a potência da portadora λ_1 . No entanto, os canais FWM-1 e FWM+2 atingem quase o mesmo nível de potência durante todas as medições realizadas. Apesar da Tabela II mostrar a ocorrência do canal FWM+1 até a potência de saída de λ_1 de -17 dBm, essa harmônica continuou sendo observada até o limite experimental de -26 dBm, com 15,66 dB.

TABELA II. OSNR DAS HARMÔNICAS GERADAS POR FWM NO SOA 3 À MEDIDA QUE A PORTADORA λ_1 É ATENUADA NA ENTRADA.

Potência (dBm)	Relação sinal-ruído óptica (OSNR) (dB)			
Potência saída λ_1	FWM-1	FWM-2	FWM+1	FWM+2
0,72	35,71	31,00	43,54	36,66
0,52	33,94	27,73	43,14	34,34
-0,25	31,99	23,58	42,10	31,41
-1,23	29,14	19,08	40,53	28,15
-2,62	26,01	14,74	39,39	24,94
-3,96	22,79	10,2	37,56	21,52
-5,88	19,19	5,88	35,96	17,92
-7,45	15,78	3,42	34,08	14,50
-9,34	12,04	—	32,10	10,91
-11,32	9,18	—	30,17	8,00
-13,28	6,84	—	28,57	6,20
-15,11	5,29	—	26,43	5,10
-17,03	—	—	24,54	—

Já a Tabela III mostra a OSNR à medida que λ_1 e λ_2 são atenuadas, enquanto suas potências são mantidas equalizadas na saída do SOA. Como pode ser observado, ao se atenuar as portadoras em até 12 dB, suas amplitudes de saída ficam

praticamente as mesmas (variação menor que 1 dB) ao longo dessa faixa de atenuação, enquanto os canais FWM perdem em OSNR. O fato do SOA estar operando num regime de saturação muito profundo faz com que a atenuação do sinal na entrada provoque o aumento do ganho, de maneira que as potências ópticas de saída das portadoras não sigam a variação da atenuação, reduzindo a eficiência da FWM. As medições foram consideradas para valores de potência de até -0,4 dBm, pois não foi mais possível a equalização das portadoras. Além disso, ao contrário do que acontece com os experimentos dos SOAs anteriores, a OSNR dos canais FWM+1 e FWM+2 foi sempre maior que a dos canais FWM-1 e FWM-2. A Fig. 8 mostra a OSNR das 4 harmônicas sob análise em função do espaçamento entre as portadoras, adotando-se a condição de máxima potência equalizada na saída do SOA.

TABELA III. OSNR DAS HARMÔNICAS GERADAS POR FWM NO SOA 3 À MEDIDA QUE AMBAS AS PORTADORAS SÃO ATENUADAS NA ENTRADA.

Potência (dBm)	Relação sinal-ruído óptica (OSNR) (dB)			
Pot. saída λ_1 e λ_2	FWM-1	FWM-2	FWM+1	FWM+2
0,38	35,50	31,70	43,94	37,06
0,59	34,16	28,95	42,23	34,74
0,44	31,22	26,70	39,47	32,03
0,77	27,42	22,19	35,91	28,48
0,55	24,37	18,23	32,62	25,25
-0,33	18,38	13,88	28,20	21,85

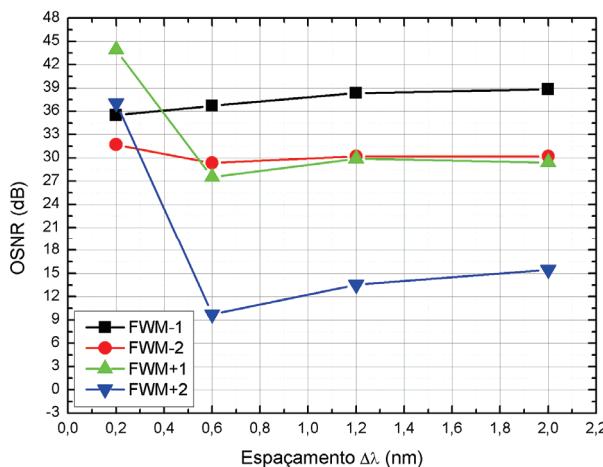


Fig. 8. OSNR dos produtos FWM do SOA 3 em função do espaçamento entre portadoras equalizadas em máxima potência.

De uma forma geral, a OSNR dos canais apresentados é maior que a dos mesmos canais gerados pelos outros SOAs (Fig. 6 e 7). É interessante observar que, no intervalo de 0,6 a 2 nm, há um acréscimo da OSNR com o aumento do espaçamento. Isso acontece devido ao desaparecimento de produtos de ordem superior, liberando energia para as demais harmônicas. Por outro lado, de um modo geral, as harmônicas à esquerda das portadoras tendem a apresentar OSNR mais uniformemente distribuída ao longo da faixa analisada, com as harmônicas à direita apresentando variações para espaçamento abaixo de 0,6 nm. O espaçamento foi limitado a 2 nm, uma vez que esse espaçamento vai além daqueles utilizados em fontes de frequência.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a caracterização experimental da FWM em SOAs com diferentes comprimentos da cavidade. Nesse caso, observou-se como o número de linhas geradas e o

nível de OSNR das harmônicas da FWM são influenciados pela variação de potência das portadoras ópticas e da distância espectral entre elas. De um modo geral, verificou-se que a FWM nos SOAs respondeu de forma diferente à diferença de potência entre as portadoras envolvidas no processo. Assim, menores valores de potência de uma ou outra portadora geraram um número menor de linhas. No entanto, observou-se que, quando a potência da portadora 1 é variada, tem-se uma situação onde a amplitude das harmônicas se mostra mais simétrica. Dos resultados para cada SOA avaliado, verificou-se a geração de um grande número de harmônicas pelo SOA 3, onde o efeito da FWM é mais pronunciado em comparação ao dos outros dispositivos. Assim, para um espaçamento de 0,2 nm, seis harmônicas a mais de alta OSNR foram geradas na saída do SOA 3, o que faria deste o mais indicado para aplicações em OFCGs. No entanto, esse SOA foi o que exibiu maior susceptibilidade à polarização da luz acoplada, ao controle de temperatura e à alimentação eletrônica, além do custo mais elevado. Assim, dependendo dos requisitos de projeto e do número de linhas que o supercanal possa precisar, uma solução mais viável poderia ser o SOA 2. Já o SOA 1 não mostrou desempenho adequado para essas aplicações. Futuramente, devem-se colocar os SOAs 2 e 3 em montagens específicas de OFCGs para avaliação de desempenho.

REFERÊNCIAS

- [1] Cisco Press Release, “Annual Cisco Visual Networking Index Forecast Projects Global IP Traffic to Increase More Than Fourfold by 2014”, Disponível em: http://newsroom.cisco.com/dlls/2010/prod_060210.html.
- [2] S. Chandrasekhar e Xiang Liu, “Terabit superchannels for high spectral efficiency transmission”, Anais da European Conference on Optical Communication, ECOC 2010, Tu.3.C.5, Torino, Itália, 2010.
- [3] L. H. H. Carvalho et al., “Generation and coherent detection of a 400-Gb/s CO-OFDM superchannel with 6.4-b/s/Hz”, Anais do Frontiers in Optics, FiO 2013, FM4B.3, Orlando, EUA, 2013.
- [4] A. C. Bordonali, M. J. Fice e A. J. Seeds, “Optical injection locking to optical frequency combs for superchannel coherent detection”, *Opt. Exp.*, vol. 23, no. 2, pp.1547-1557, 2015.
- [5] T. Sakamoto, T. Kawanishi e M. Izutsu, “Asymptotic formalism for ultraflat optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator”, *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 11, pp. 1515-1517, 2007.
- [6] Y. Dou, H. Zhang e M. Yao, “Generation of flat optical-frequency comb using cascaded intensity and phase modulators”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 9, pp. 727-729, 2012.
- [7] S. Bennett, B. Cai, E. Burr, O. Gough e A. J. Seeds, “1.8-THz bandwidth, zero-frequency error, tunable optical comb generator for DWDM applications”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 5, pp. 551-553, 1999.
- [8] D. M. Pataca, F. D. Simões e M. L. Rocha, “Optical frequency comb generator for coherent WDM system in Tb/s applications”, Anais da International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC 2011, pp. 30-34, Natal, RN, 2011.
- [9] R. Maher et al., “Low cost comb source in a coherent wavelength division multiplexed system”, Anais da European Conference on Optical Communication, ECOC 2010, P3.07, Torino, Itália, 2010.
- [10] E. C. Magalhães, E. Conforti e A. C. Bordonali, “Empirical characterization of wavelength conversion for phase modulated channels based on SOA-FWM properties”, Anais do Latin America Optics and Photonics Conference, LAOP 2010, TuB3, Recife, PE, Brasil, 2010.
- [11] N. S. Ribeiro, C. M. Gallop, A. L. R. Cavalcante e E. Conforti, “Four wave mixing characterization of semiconductor optical amplifiers with different cavity lengths”, Anais da International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC 2007, pp. 203-206, Salvador, BA, 2007.
- [12] N. S. Ribeiro, C. M. Gallop, A. L. Toazza e E. Conforti, “Caracterização de FWM em amplificador óptico a semicondutor ultra-longo”, Anais do 13º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, MOMAG 2008, pp. 924-928, Florianópolis, SC, 2008.