

4

Conversão de comprimento de onda utilizando modulação de ganho cruzado em SOAs

Neste Capítulo, são apresentados os resultados experimentais de conversão de comprimento de onda em um SOA utilizando a modulação de ganho cruzado. Foram usadas as técnicas de “*pump & probe*” e “ASE-XGM”, descritas no Capítulo 3. O sinal óptico modulado usado nos experimentos foi um trem de pulsos ópticos ultra-curtos, com 50 ps de duração a meia altura (FWHM) e 1 GHz de taxa de repetição.

Foram obtidos resultados experimentais de conversão de comprimento de onda utilizando-se dois amplificadores ópticos semicondutores diferentes, ambos na faixa de comprimentos de onda em torno de 1550 nm: o primeiro foi um dispositivo sem encapsulamento, dito sub-montado, que foi colocado na extremidade de uma linha de transmissão microstrip de 50 Ω . O segundo SOA empregado foi um dispositivo encapsulado, modelo “IPSAD1503” da InPhenix. Ambos os amplificadores são estruturas do tipo multi-quantum well.

Foram investigadas aqui duas características dos pulsos ópticos convertidos em comprimento de onda: duração e amplitude, para diferentes situações: em função do comprimento de onda do *probe*, para variações de corrente de polarização do SOA e para diferentes potências do *probe*.

Serão apresentados inicialmente os resultados obtidos com o SOA sub-montado e em seguida serão mostrados alguns resultados com o dispositivo da InPhenix.

Todos os dispositivos empregados foram caracterizados individualmente, e suas características estão descritas no Apêndice A. Neste Apêndice, estão demonstradas as curvas e os diagramas das medições dos componentes utilizados, começando pelo laser DFB, seguido pelo gerador de pulsos curtos e o modulador externo; depois são apresentadas as características dos SOAs, como ganho, espectros de ganho e de ASE. Por fim, são mostrados o ganho, espectro de ganho e de ASE do EDFA, e a perda de inserção em função do comprimento de onda do filtro passa-faixa óptico sintonizável empregado.

4.1

Conversão de comprimento de onda utilizando a técnica de *pump & probe*

Conforme descrito no Capítulo 3, a técnica denominada *pump & probe* baseia-se no uso de duas fontes de luz, uma delas modulada, o *pump*, e a outra em modo contínuo, o *probe*. A onda contínua perceberá as variações de ganho impostas pelo *pump*.

4.1.1

Configuração experimental

A configuração experimental para a técnica *pump & probe* está mostrada na Figura 4.1. Este experimento utilizou dois sinais ópticos, um deles fixo em comprimento de onda, o *pump*, e o outro, obtido através de um laser sintonizável - *probe*. O laser *pump* é do tipo DFB, com comprimento de onda central de emissão de 1556 nm . Um modulador externo do tipo Mach-Zehnder de LiNbO_3 com 20 GHz de banda foi empregado para modular o sinal do *pump*. O acoplamento dos dois sinais ópticos ao SOA foi feito através de um combinador. No caso do SOA sub-montado, a luz foi acoplada e retirada do amplificador através de lentes do tipo GRIN acopladas a um *pigtail*. Os demais componentes eram *pigtailed* em fibra monomodo convencional.

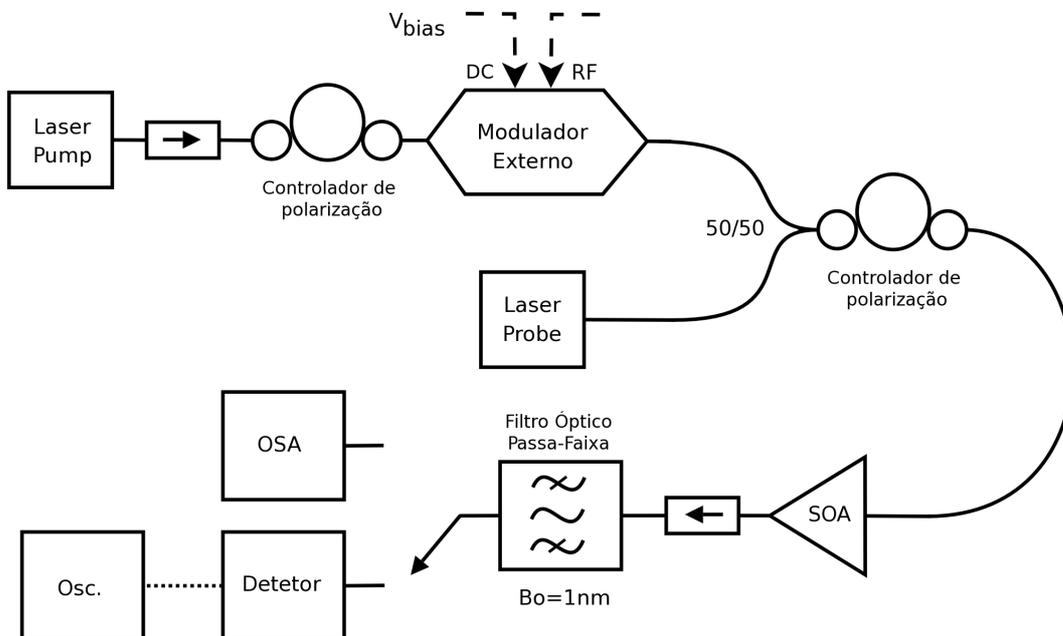


Figura 4.1: Diagrama do experimento *pump & probe*.

Controladores de polarização foram adicionados às entradas do modulador externo e do SOA, pois as fibras disponíveis não mantêm a polarização

e estes dispositivos são sensíveis a esta característica da onda incidente. Isoladores colocados nas saídas do laser *pump* e do SOA evitaram reflexões espúrias que formariam uma cavidade externa ao amplificador, transformando o amplificador em laser.

Após o SOA, um filtro óptico passa-faixa sintonizável, centrado no comprimento de onda do *probe*, seleciona apenas o sinal convertido. Este filtro é do tipo Fabry-Perot, tem 1 nm de banda passante e sua faixa nominal de sintonia é a banda “C”, de aproximadamente 1530 a 1561 nm. Para a detecção, os sinais foram registrados por um analisador de espectro óptico ou no tempo, por um fotodetector rápido (25 GHz de largura de banda) e um osciloscópio de amostragem. O sistema de detecção tem resolução de 40 ps, o que não compromete as medições dos pulsos ópticos convertidos. Os pulsos no osciloscópio foram registrados de variadas formas: por uma impressora do tipo *plotter*, por aquisição de dados utilizando o programa LabVIEW©, ou por câmera fotográfica digital.

Para a caracterização das técnicas, foram usados pulsos elétricos curtos com duração de 50 ps (FWHM) e taxa de repetição de 1 GHz. Estes pulsos são obtidos através de um gerador de pente alimentado por um sintetizador com frequência de 1 GHz. Para excitar o gerador de pente, é necessário aplicar uma portadora de RF com potência média de 1 W (30 dBm) em sua entrada. Portanto, utilizou-se um amplificador de RF na saída do sintetizador. O gerador de pente nessas condições produziu pulsos elétricos com 10 V de amplitude de pico. Um atenuador variável foi inserido após o gerador de pente, para ajustar a amplitude do sinal elétrico aplicado à entrada de RF do modulador externo. O sinal *pump* do laser semiconductor atravessa o modulador externo sendo modulado pelos pulsos aplicados e é acoplado ao SOA, juntamente com o sinal *probe*, através do combinador.

4.1.2

Resultados experimentais para o SOA sub-montado

Nota: Os resultados mostrados aqui nesta dissertação foram obtidos com algum grau de incerteza, devido principalmente ao baixo nível de sinal, somado à presença de ruído, dos pulsos convertidos detectados.

A Figura 4.2 mostra o trem de pulsos elétricos obtido na saída do gerador de pente e aplicado na entrada de RF do modulador externo. É interessante ressaltar que o modulador, de acordo com sua curva de transmissão em função da tensão aplicada mostrada no Apêndice A e repetida na Figura 4.3, pode ser polarizado em dois pontos diferentes e, conseqüentemente, atuar em duas situações distintas. Como os pulsos elétricos aplicados são negativos,

polarizando-se o modulador com uma tensão $V_{bias} = V_{\pi} = 8V$, o SOA estará mais saturado na presença dos pulsos ópticos incidentes. Uma outra situação consiste em polarizar o modulador na tensão de transmissão máxima, quando $V_{bias} = 0V$, de forma que o amplificador esteja sempre saturado pelo *pump* e saia da saturação na presença dos pulsos.

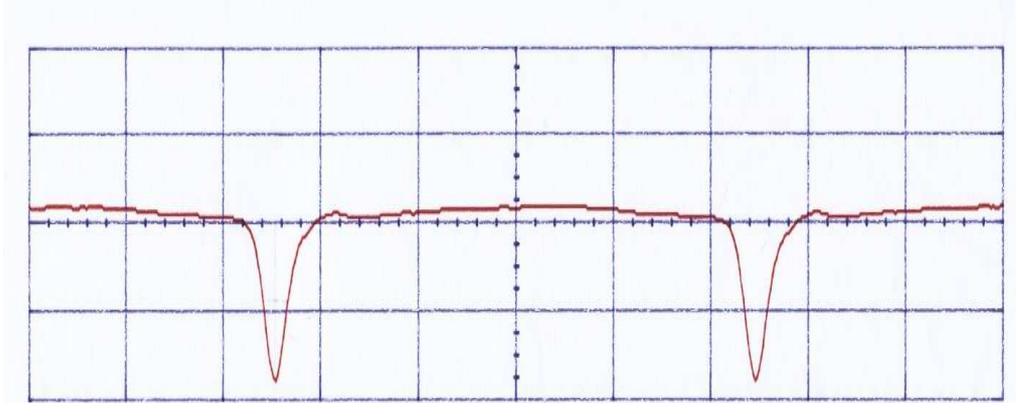


Figura 4.2: Pulsos elétricos utilizados para a caracterização. Escala vertical: 3,162 V/div. Escala horizontal: 200 ps/div.

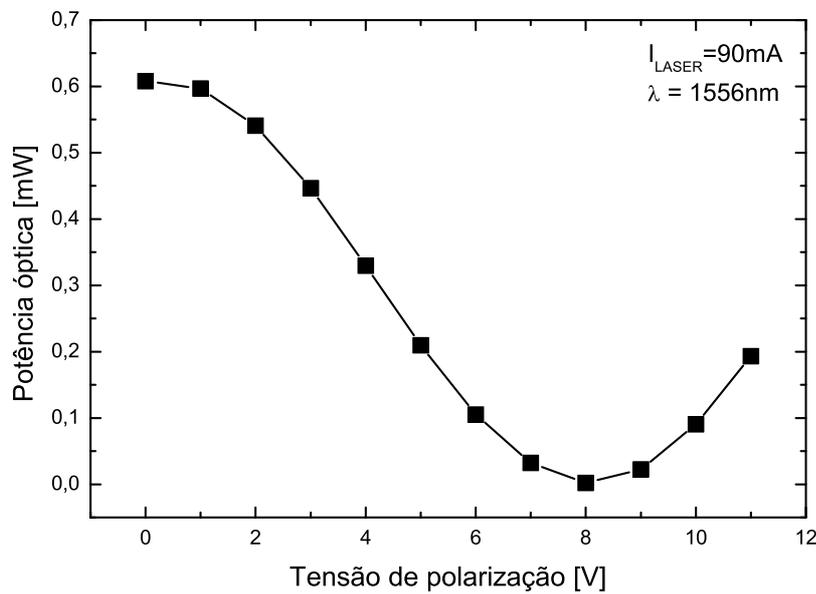


Figura 4.3: Curva de transferência do modulador externo.

A Figura 4.4 mostra dois exemplos de pulsos de *pump* na saída do modulador externo, para os dois extremos da curva do modulador externo. Verifica-se que eles são praticamente uma réplica do sinal elétrico de entrada, com 50 ps de duração a meia-altura.

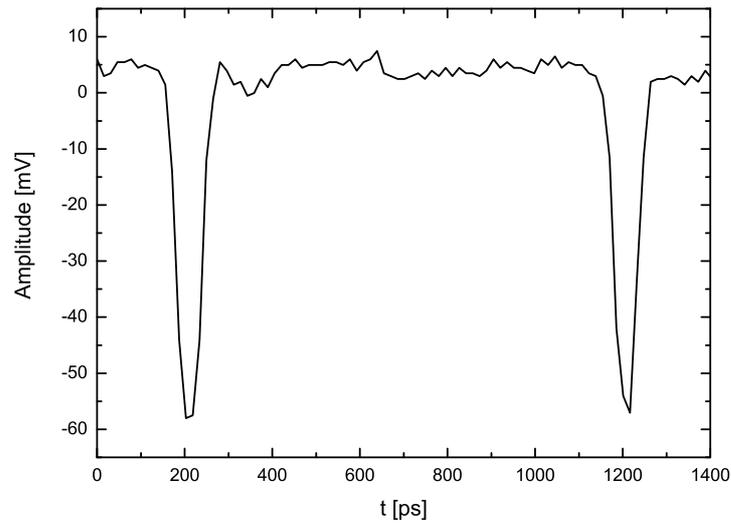
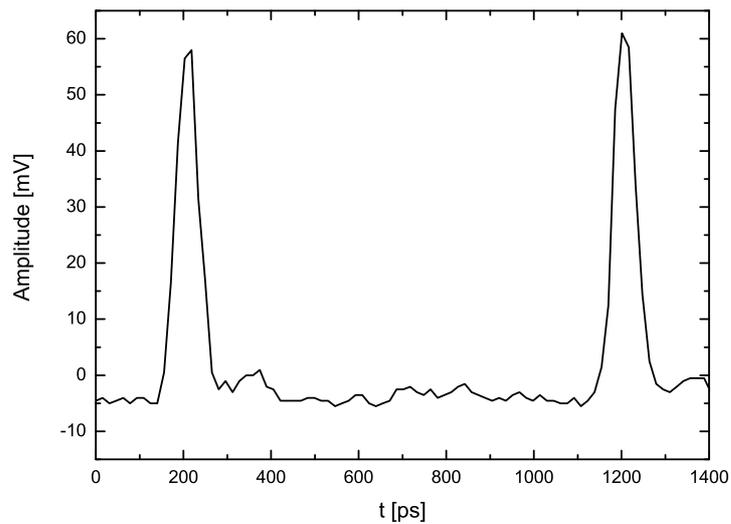
4.4(a): $V_{mod} = 0V$ 4.4(b): $V_{mod} = V_{bias}$

Figura 4.4: Pulsos ópticos na saída do modulador externo.

Os pulsos convertidos em comprimento de onda foram investigados em diferentes situações: primeiramente um teste para avaliar o efeito do ponto de polarização do modulador externo, depois em função do comprimento de onda do *probe*, para variações de corrente de polarização do amplificador e para diferentes potências do *probe*.

Para avaliar o efeito do ponto de polarização do modulador externo nos pulsos convertidos em comprimento de onda, foram feitos testes idênticos para os dois pontos extremos da curva do dispositivo, $V_{bias} = 0 V$ e $V_{bias} = V_{\pi}$ (aproximadamente $8 V$), mantendo-se fixos os comprimentos de onda do *pump* e do *probe*, a corrente do SOA e a potência de *pump*. A potência de *pump* para $V_{bias} = 0 V$ foi de aproximadamente $-2 dBm$, enquanto que para $V_{bias} = V_{\pi}$, foi de $-15 dBm$, valores estes medidos antes do combinador.

A diferença nos valores de potência se deve à inversão de polaridade dos pulsos ópticos na saída do modulador externo para as duas situações. Para $V_{bias} = 0 V$, a luz incidente atravessa o dispositivo na maior parte do tempo, sendo interrompida somente na presença dos pulsos. No caso de $V_{bias} = V_{\pi}$, ocorre exatamente o oposto.

Para este teste, foi variada apenas a potência do *probe*. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram os pulsos convertidos e observados no osciloscópio digital, para três valores de potência de *probe*: 0 , $-10 dBm$ e $-20 dBm$, respectivamente. É interessante notar que os pulsos convertidos têm polaridades invertidas em relação ao sinal injetado na entrada do amplificador. Isto ocorre pois a modulação imposta é reversa, conforme previsto na teoria, exposta no ítem 3.2.1; caso se tratassem de sinais binários, teriam sua lógica invertida.

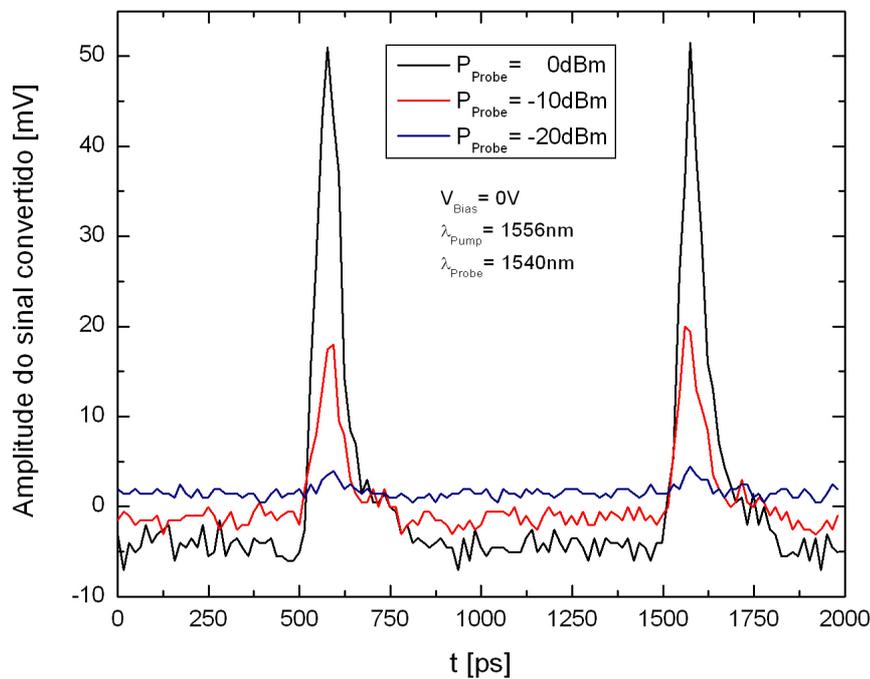


Figura 4.5: Forma dos pulsos convertidos, no tempo, para uma variação de P_{probe} , para SOA sub-montado. $V_{bias} = 0V$.

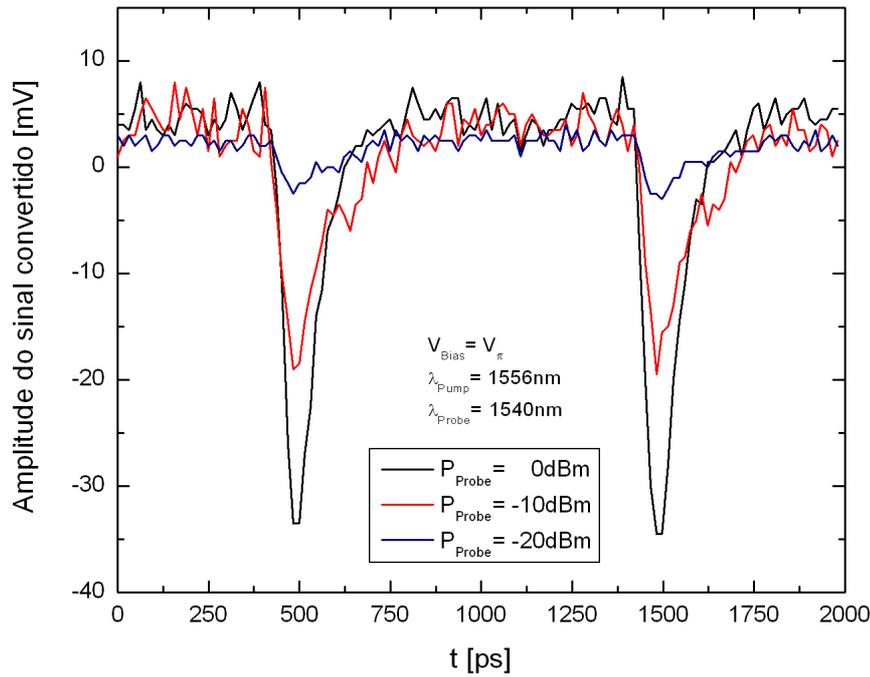


Figura 4.6: Forma dos pulsos convertidos, no tempo, para uma variação de P_{probe} , para SOA sub-montado. $V_{bias} = V_{\pi}$.

É importante salientar que esses pulsos convertidos são sempre mais longos que os pulsos do sinal de *pump*, com aproximadamente 100 ps de FWHM, devido ao tempo finito de recuperação de ganho. Os tempos intrínsecos associados à técnica podem ser inferidos qualitativamente das Figuras 4.5 e 4.6. Percebe-se que o tempo de “subida” (início) do pulso convertido é menor que o de “descida” (final do pulso). A razão para isto é que na “subida” do pulso de excitação, o fenômeno responsável pela saturação do ganho, é a emissão estimulada pelos sinais de entrada [34, 69]; na “descida” do pulso de excitação, quem domina é o tempo de recuperação do ganho, que é, geralmente, mais lento que a transição forçada pela emissão estimulada [29, 34, 47, 69].

Notar-se-á que, no caso da Figura 4.5, seria de se esperar um comportamento oposto ao da Figura 4.6; estando o amplificador em “pequenos sinais” quando há o pulso de excitação, a “volta” do pulso convertido ao patamar de nível alto deveria ser tão rápida como a sua descida ao nível baixo. Isto ocorre devido às estruturas de poços quânticos demonstrarem efeitos de “transporte” de portadores, possuindo armazenamento de portadores nas regiões de barreira [69–71], o que leva a um aumento do tempo de recuperação de ganho [71].

Outra observação importante a ser feita são as maiores durações apresentadas pelos pulsos convertidos da Figura 4.6, quando comparados aos pulsos correspondentes da Figura 4.5. Acredita-se que isto ocorra devido às diferentes dinâmicas de ganho envolvidas nos dois casos. Quando o modulador está polarizado em V_π (Figura 4.6), o amplificador se comporta de maneira quase linear até a chegada do pulso; isto ocorrendo, o SOA então satura, voltando à condição anterior após o pulso decair. No caso da polarização no valor máximo de potência, como na Figura 4.5, o amplificador comporta-se a maior parte do tempo saturado, tornando seu ganho mais linear com a chegada do pulso. Devido a este comportamento, parece razoável esperar tal resultado, uma vez que um amplificador mais saturado sempre tende a ter uma resposta mais rápida para as variações do ganho.

Das Figuras 4.5 e 4.6, pode-se perceber, ainda, que a amplitude do sinal convertido pela técnica de *pump* e *probe* aumenta com a potência do sinal *probe*, pois há um sinal maior para ser modulado. O sinal de *probe* deve ter uma potência mínima para que o efeito ocorra satisfatoriamente, i.e., com potência tal que possa ser detectado após ser modulado pelo ganho cruzado. Para o caso de uma potência de *pump* menor, quando $V_{bias} = V_\pi$, a amplitude dos pulsos convertidos também aumenta com a potência de *probe*, como pode se ver na Figura 4.6.

a) Variação da corrente de polarização do SOA

A Figura 4.7 mostra a variação da amplitude dos pulsos convertidos em função da corrente de polarização do SOA, para diferentes comprimentos de onda do *probe*. A Figura 4.8 mostra as durações dos pulsos correspondentes. Estes resultados foram obtidos com o modulador externo polarizado no máximo de sua curva, com $V_{bias} = 0V$.

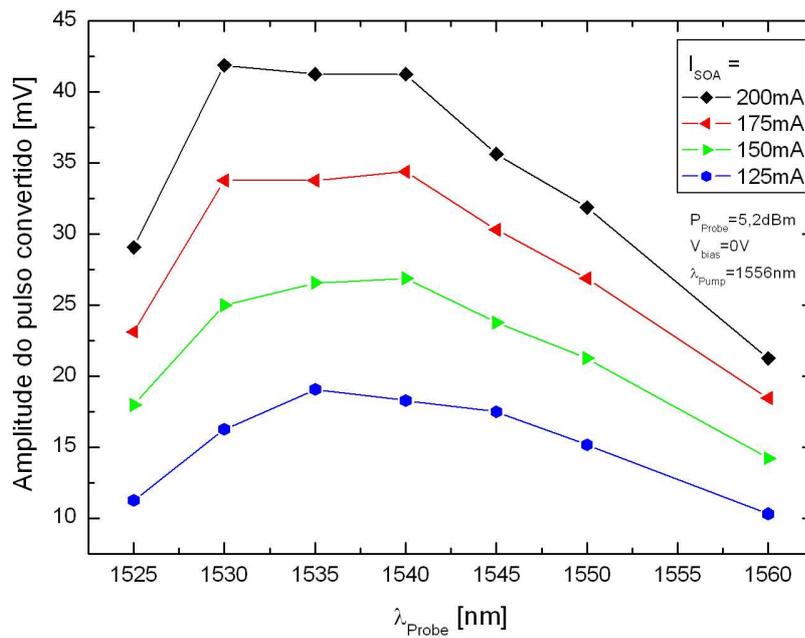


Figura 4.7: Amplitude de pulsos convertidos em função de comprimento de onda do *probe*, para uma variação de corrente de polarização do SOA sub-montado. $V_{\text{bias}} = 0\text{V}$.

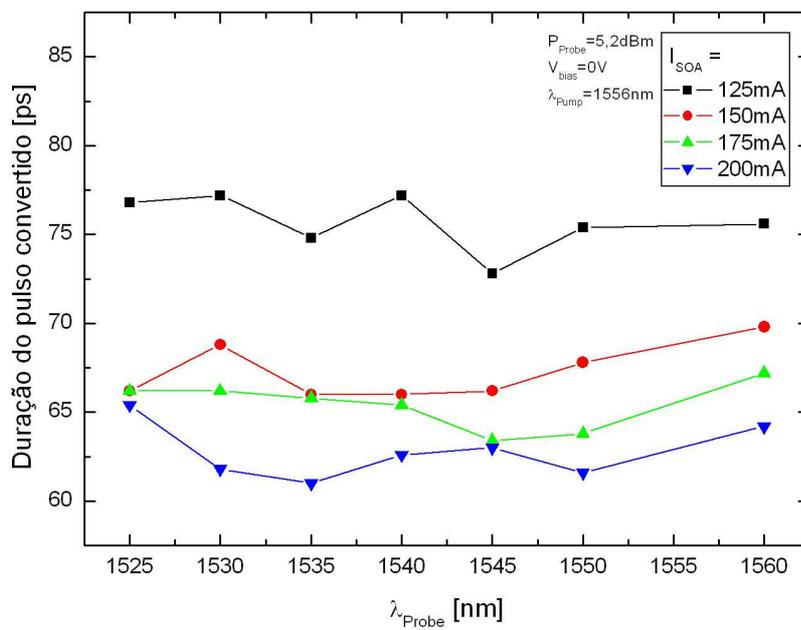


Figura 4.8: Duração de pulsos convertidos em função de comprimento de onda do *probe*, para uma variação de corrente de polarização do SOA sub-montado. $V_{\text{bias}} = 0\text{V}$.

Para uma variação da corrente de polarização do SOA, observa-se na Figura 4.7 que, com uma maior corrente de polarização, há uma maior amplitude de pulso, pois o ganho será maior, sendo maior o efeito de modulação imposta pelo sinal *pump*.

Com relação ao comprimento de onda do *probe*, a amplitude dos pulsos convertidos tende a acompanhar o comportamento da ASE e do ganho do SOA, ou seja, quanto maior a corrente, o comprimento de onda de pico é deslocado para valores menores de comprimentos de onda, pois o ganho será maior nesses pontos, como previsto no Capítulo 2, item 2.2.4.

A duração dos pulsos convertidos diminuiu com um aumento da corrente do amplificador, já que o tempo de recuperação do ganho é menor com o aumento da corrente. As durações foram de 60 a 80 ps e pouco variaram com o comprimento de onda.

b) Variação de potência de *probe*

Neste caso, foi variada a potência de *probe*, fornecida pelo laser sintonizável. Os pulsos foram registrados nos mesmos valores de comprimento de onda do caso anterior. Na Figura 4.9 encontram-se as amplitudes dos pulsos e as durações estão na Figura 4.10.

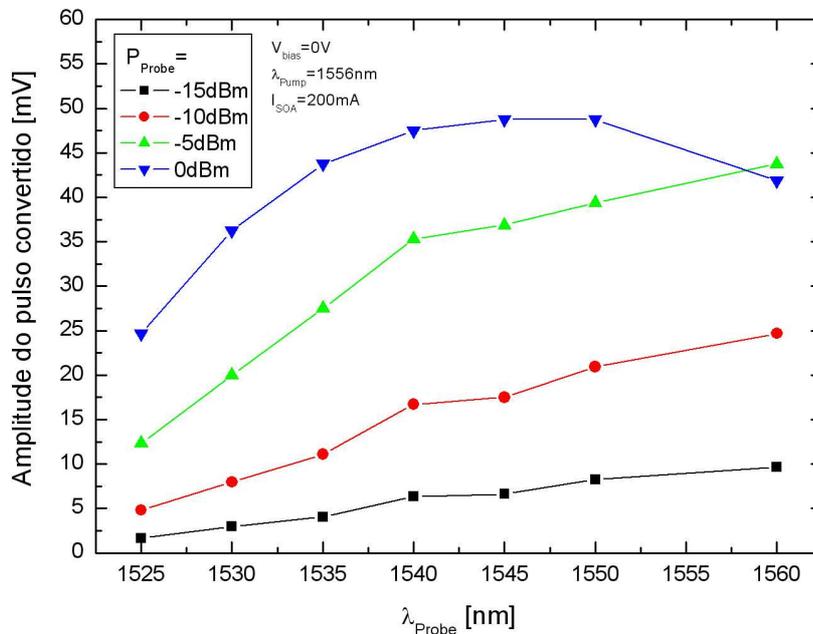


Figura 4.9: Amplitude de pulsos convertidos em função de comprimento de onda do *probe*, para uma variação de potência de *probe*. SOA sub-montado, $V_{\text{bias}} = 0V$.

Assim como na Figura 4.5, um aumento na potência de *probe* implica uma maior modulação de ganho, portanto imprimindo uma modulação maior no *probe*. Para as variações de comprimento de onda, as curvas obtidas para valores de potência de *probe* menores que 0 dBm apresentaram comportamento crescente com o comprimento de onda, enquanto para $P_{probe} = 0$ dBm, esta apresentou uma curva similar à de espectro de ganho, pois já se aproxima da saturação do conversor.

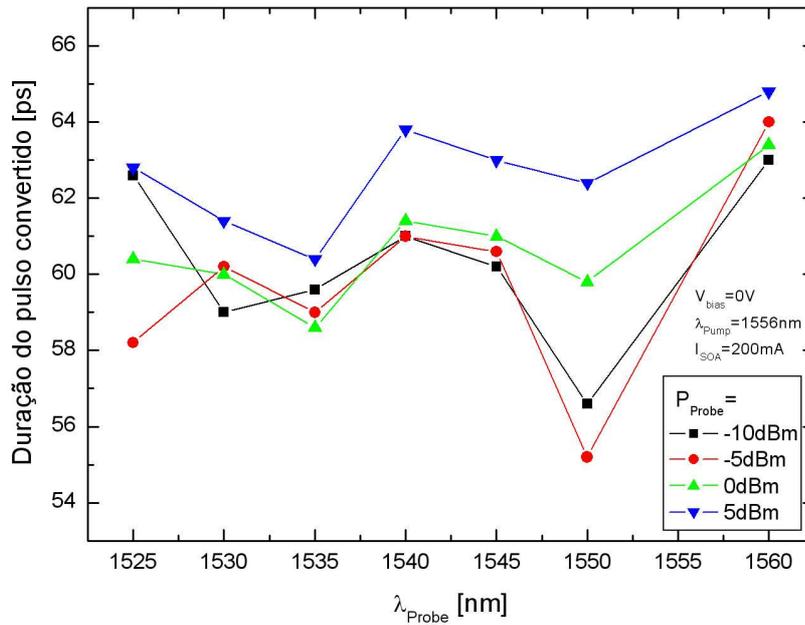


Figura 4.10: Duração de pulsos convertidos em função de comprimento de onda do *probe*, para uma variação de potência de *probe*. SOA sub-montado, $V_{bias} = 0V$.

As durações ficaram em torno de 60 ps e não foram praticamente alteradas com a variação da potência do *probe*, indicando, assim, que a duração do pulso não é afetada por estes valores de potência de *probe*, pois, neste caso, o amplificador já estava muito saturado pela alta potência do *pump* e do *probe*.

4.1.3

Resultados experimentais para o SOA encapsulado

O SOA sub-montado, utilizado para a obtenção dos resultados mostrados anteriormente, sofreu danos irreparáveis como resultado de um acidente. Então, alguns resultados adicionais para este trabalho foram obtidos com um amplificador encapsulado, modelo “IPSAD1503” adquirido da empresa InPhenix. Este dispositivo tem um encapsulamento do tipo *butterfly* de 14 pinos com

pigtails de fibra monomodo padrão, e, diferentemente do anterior, permite o controle da temperatura de operação. Além disso, este é operado a correntes mais elevadas, até valores próximos a 300 mA . Este foi montado em um circuito impresso e seus terminais foram acessados através de um conector do tipo ZIF. Utilizando este amplificador, foram realizados experimentos análogos aos realizados anteriormente, fazendo uso do mesmo diagrama de montagem visto na Figura 4.1. Os pulsos ópticos curtos usados na caracterização são os mesmos já mostrados na Figura 4.4, com 50 ps de FWHM.

a) Variação de corrente de polarização do SOA

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram exemplos típicos dos pulsos ópticos convertidos em comprimento de onda observados no osciloscópio digital, para diferentes valores da corrente de polarização do SOA. As potências e os comprimentos de onda dos sinais de *pump* e de *probe* na entrada foram mantidos constantes nessas figuras. Estes resultados foram obtidos com o modulador externo polarizado na tensão de transmissão mínima, $V_{bias} = V_{\pi}$.



Figura 4.11: Foto de pulsos convertidos, para $I_{SOA} = 200\text{ mA}$. $P_{probe} = 0\text{ dBm}$, $\lambda_{probe} = 1560\text{ nm}$ e $\lambda_{pump} = 1556\text{ nm}$. SOA encapsulado, $V_{bias} = V_{\pi}$.

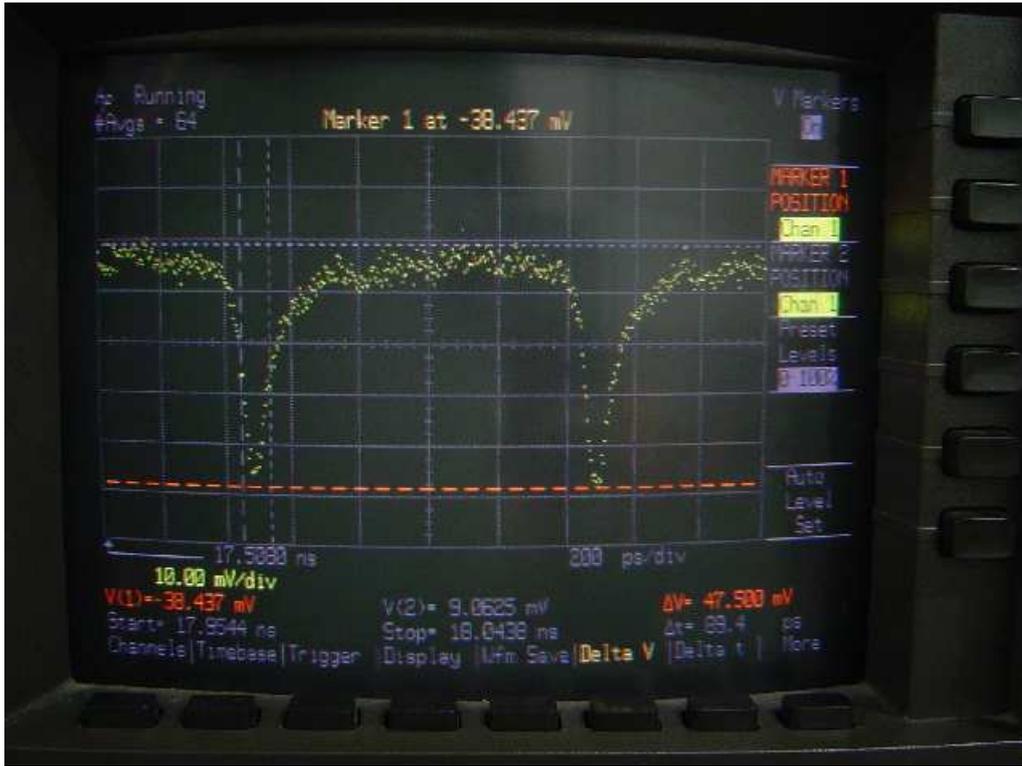


Figura 4.12: Foto de pulsos convertidos, para $I_{SOA} = 240 \text{ mA}$. $P_{probe} = 0 \text{ dBm}$, $\lambda_{probe} = 1560 \text{ nm}$ e $\lambda_{pump} = 1556 \text{ nm}$. SOA encapsulado, $V_{bias} = V_{\pi}$.

Verificou-se aqui também que as amplitudes dos pulsos convertidos aumentam com a elevação da corrente de polarização aplicada ao SOA; A duração dos pulsos, conforme esperado, é inversamente proporcional às variações na corrente do SOA, caindo de 90 ps , na Figura 4.11, para 83 ps , na Figura 4.12.

Comparando-se os resultados das Figuras 4.11 e 4.12 com aqueles obtidos para o SOA sub-montado, verifica-se que os pulsos convertidos pelo SOA encapsulado são sempre mais longos, para condições análogas de *pump* e *probe*.

No entanto, contrariamente ao SOA sub-montado do caso anterior, variações no ponto de polarização do modulador externo não mostraram variações significativas na forma e duração dos pulsos convertidos. Isto pode ser observado na Figuras 4.13 e 4.14, que mostram os pulsos convertidos nas duas situações extremas, para $V_{bias} = 0 \text{ V}$ e para $V_{bias} = V_{\pi}$.

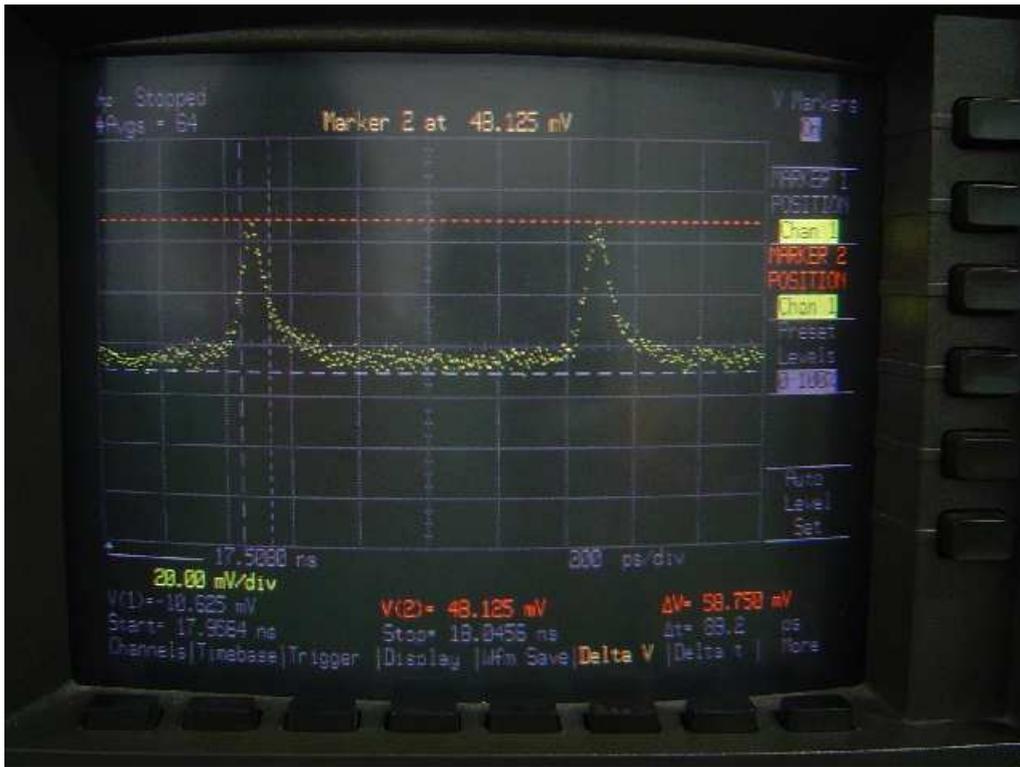


Figura 4.13: Foto de pulsos convertidos, para $I_{SOA} = 280 \text{ mA}$. $P_{probe} = 0 \text{ dBm}$, $\lambda_{probe} = 1564 \text{ nm}$ e $\lambda_{pump} = 1556 \text{ nm}$. SOA encapsulado, $V_{bias} = 0 \text{ V}$.



Figura 4.14: Foto de pulsos convertidos, para $I_{SOA} = 280 \text{ mA}$. $P_{probe} = 0 \text{ dBm}$, $\lambda_{probe} = 1564 \text{ nm}$ e $\lambda_{pump} = 1556 \text{ nm}$. SOA encapsulado, $V_{bias} = V_{\pi}$.

b) Variação de potência de *probe*

A potência do sinal de *probe* foi então variada, enquanto os comprimentos de onda e a potência do *pump* foram mantidos fixos. O comportamento para este SOA está mostrado nas Figuras 4.15 e 4.16.

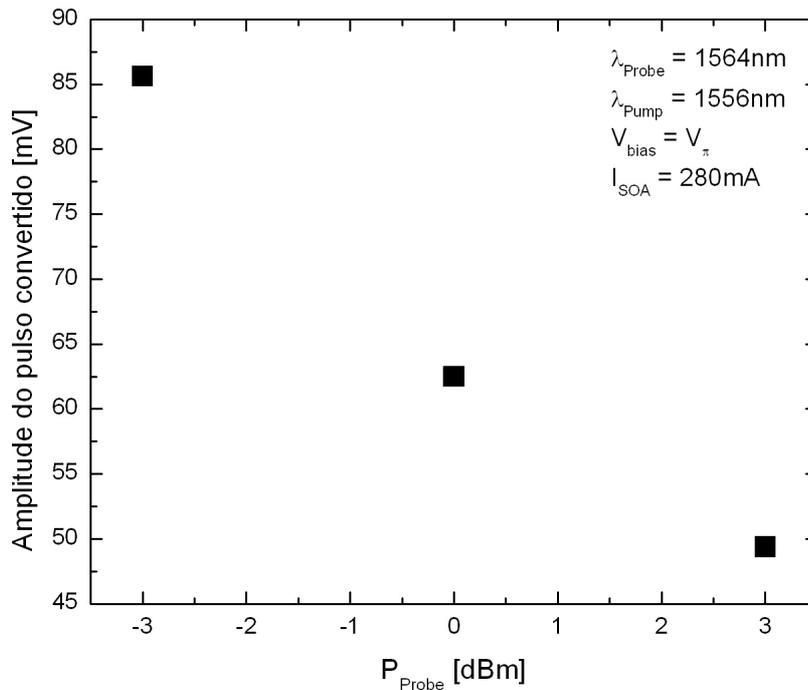


Figura 4.15: Amplitude de pulsos convertidos em função da potência de *probe*. SOA encapsulado, $V_{\text{bias}} = V_{\pi}$.

Neste teste, verificou-se que a amplitude dos pulsos convertidos não aumentou com a potência de *probe*. Acredita-se que isso ocorreu aqui, porque para esta faixa de valores de potência de *probe*, este SOA já se encontra saturado [38], dado que a potência de saturação de entrada para este dispositivo é de -11 dBm . Em outras palavras, dadas estas condições, uma maior potência do *probe* levará a uma menor modulação de ganho do amplificador, gerando uma diminuição da amplitude de pulso convertido.

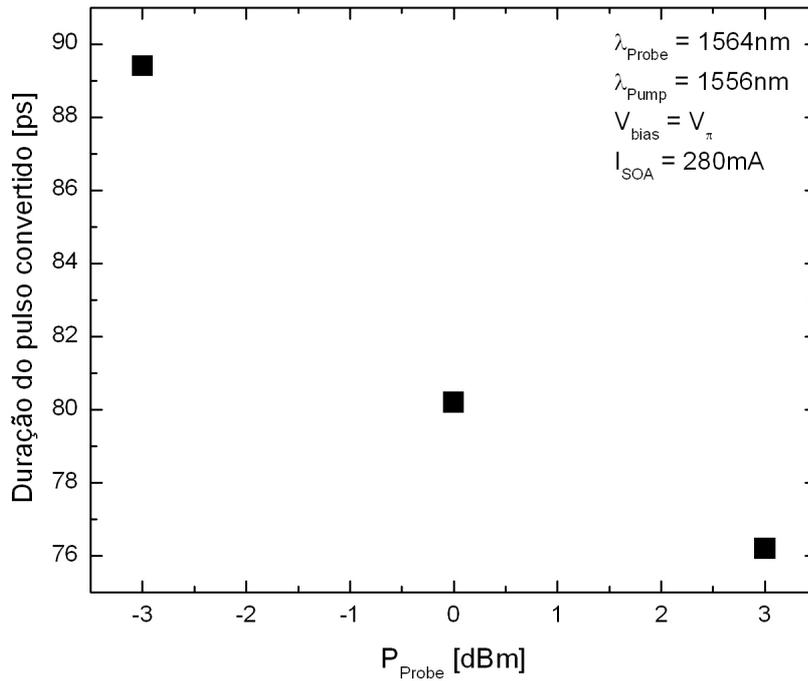


Figura 4.16: Duração de pulsos convertidos em função da potência de *probe*. SOA encapsulado, $V_{bias} = V_{\pi}$.

Como há um aumento na quantidade de fótons na região ativa com uma maior potência de *probe*, o tempo de recuperação de ganho é menor; portanto, as durações dos pulsos convertidos são menores, como pode ser visto na Figura 4.16.

c) Variação do comprimento de onda do *probe*

Para identificar como os pulsos convertidos se comportam ao variar-se o comprimento de onda de *probe*, foi feito um experimento fixando as potências de *pump* e de *probe*, e o comprimento de onda do *pump*. Deste experimento resultou a Figura 4.17, que contém as amplitudes dos pulsos convertidos e também a Figura 4.18, que mostra a variação da duração dos pulsos. Para este teste, a potência de *probe* foi fixada em 0 dBm, a corrente de polarização do SOA em 280 mA e o modulador externo polarizado em V_{π} .

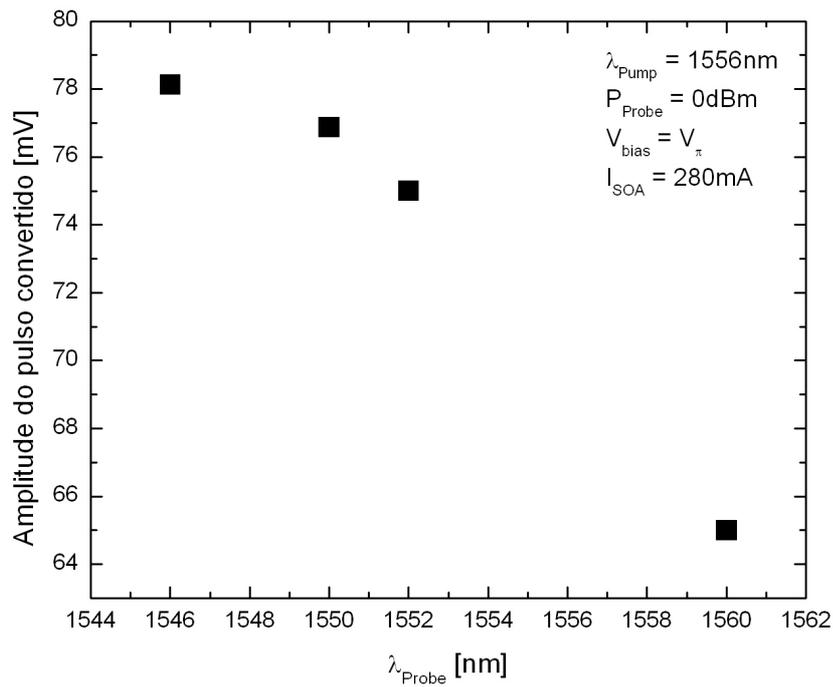


Figura 4.17: Amplitude de pulsos convertidos em função de comprimento de onda do *probe*. SOA encapsulado, $V_{\text{bias}} = V_{\pi}$.

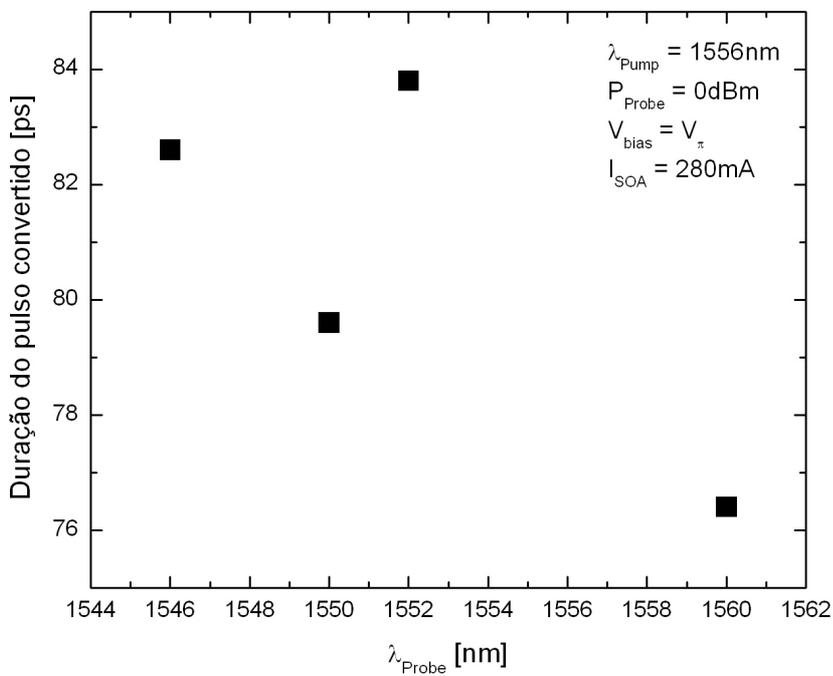


Figura 4.18: Duração de pulsos convertidos em função de comprimento de onda do *probe*. SOA encapsulado, $V_{\text{bias}} = V_{\pi}$.

Para um valor fixo de comprimento de onda do *pump*, um aumento no valor do comprimento de onda do *probe* causou uma diminuição na amplitude dos pulsos, pois esta faixa de comprimentos de onda está mais longe do valor máximo de ganho do SOA, para esta corrente de polarização. A duração dos pulsos se manteve na mesma ordem de grandeza, de 80 ps, apesar de uma aparente tendência à diminuição com um aumento no comprimento de onda do *probe*, mostrando mais uma vez que o tempo de recuperação de ganho é pouco dependente do comprimento de onda do *probe*, pois o ganho saturado é mais plano do que o ganho para pequenos sinais.

4.2

Conversão de comprimento de onda utilizando a técnica ASE-XGM

O método de conversão de comprimento de onda denominado “modulação de ganho cruzado da ASE”, ou ASE-XGM, foi também montado experimentalmente neste trabalho. Esta forma alternativa de conversão de comprimento de onda utilizando-se SOAs é obtida modulando-se o espectro da ASE do dispositivo, conforme foi descrito no Capítulo 3. Neste caso, não é necessária a fonte *probe*, uma vez que o sinal de *pump* vai modular o espectro inteiro de ASE através do efeito de modulação de ganho cruzado, ou XGM. Esta técnica é implementada saturando-se o SOA com o sinal de *pump*, de forma a comprimir seu ganho. Quando um sinal de forte intensidade é acoplado ao SOA, o ganho deixa de ser linear e o espectro de ganho é deslocado para baixo. O comportamento oposto ocorre quando o sinal é fraco ou inexistente. O espectro de ASE segue o comportamento do ganho e é, então, inversamente modulado com relação ao sinal de entrada. Conseqüentemente, a polaridade do sinal convertido também é invertida, como na técnica anterior.

Conforme mencionado anteriormente, obtém-se o sinal convertido em qualquer comprimento de onda a partir de um único sinal de entrada, o *pump*. A seleção do sinal convertido é feita por um filtro passa-faixa sintonizável na saída. Esta técnica de filtragem é conhecida como *spectrum slicing* [9–11, 49, 55, 56].

4.2.1

Configuração experimental

A configuração experimental utilizada para a conversão de comprimento de onda usando o método da ASE-XGM está mostrada na Figura 4.19. A diferença fundamental com relação ao método de *pump* e *probe* descrito anteriormente é a ausência de uma fonte de luz *probe*, pois o espectro da ASE do SOA fará o papel de sinal “*probe*”. Portanto, a montagem da Figura

4.19 é muito semelhante ao diagrama da Figura 4.1: foi retirado o sinal *probe* e, por conseqüência, o combinador, e foi adicionado um atenuador variável antes do SOA, para controlar a potência de *pump*. O laser *pump* é do tipo DFB, com comprimento de onda central de emissão de 1556 nm , para a corrente de 100 mA . Este sinal foi modulado pelos pulsos curtos com 50 ps de FWHM, aplicados ao modulador externo, antes de ser acoplado ao SOA. Alternativamente, o laser DFB foi substituído em alguns casos pelo laser sintonizável, para permitir variações no comprimento de onda do sinal de *pump*.

Em alguns dos testes, utilizou-se também um amplificador a fibra dopada com Érbio, EDFA, como pré-amplificador. Ele foi utilizado para aumentar a potência recebida no detector. Este amplificador não influencia no tempo de resposta dos efeitos, pois tem tempos de recuperação de ganho bem maiores que o do SOA, da ordem do milissegundo [25].

Tal como no método anterior, foram executados testes com os dois SOAs, o sub-montado e o encapsulado. Novamente aqui, no caso do SOA sub-montado, o acoplamento do sinal óptico na entrada e na saída do SOA foi feito através de lentes do tipo GRIN com cobertura anti-reflexiva. Todos os outros componentes têm *pigtail* de fibra monomodo padrão.

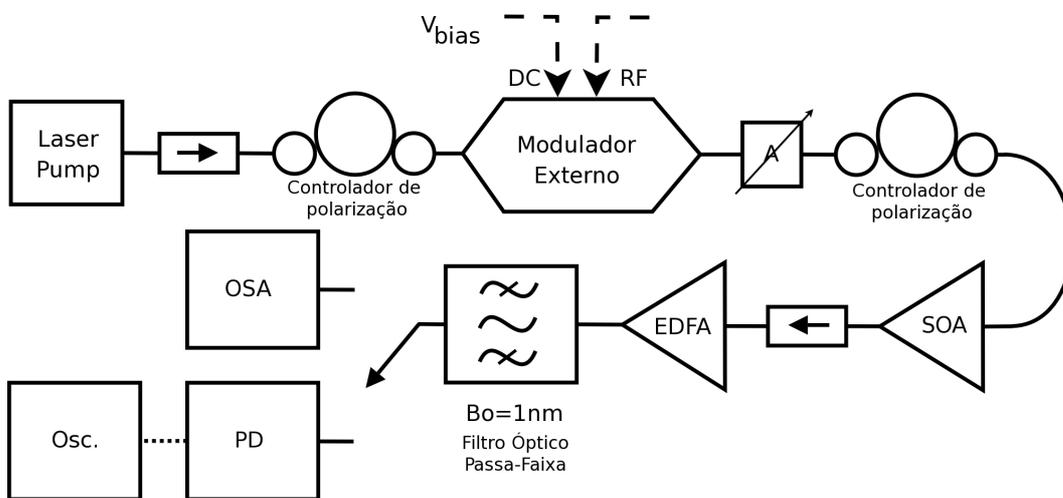


Figura 4.19: Diagrama do experimento ASE-XGM.

Serão apresentados inicialmente os resultados obtidos com o SOA sub-montado e, em seguida, serão mostrados alguns resultados com o dispositivo da InPhenix.

4.2.2

Resultados experimentais para o SOA sub-montado

Como a técnica de conversão de ASE-XGM ainda é pouco conhecida, com poucos resultados disponíveis na literatura [9–11, 50–54], a caracterização experimental desta técnica foi iniciada com a obtenção de alguns resultados de espectros de ASE-XGM na saída do SOA em diferentes níveis de potência do sinal *pump*, para investigar a razão de extinção do sinal convertido, e a eficiência de conversão no intervalo espectral [49]. A partir daí, foram investigados os pulsos convertidos em comprimento de onda para diversas situações, como diferentes correntes de polarização do SOA, potências do sinal de *pump* e para diferentes comprimentos de onda do filtro sintonizável de saída. Também foi variado o ponto de polarização do modulador externo. Para estas caracterizações foram usados como *pump* os pulsos ópticos com 50ps de duração à meia-altura, FWHM - *Full Width at Half Maximum*, mostrados na Figura 4.4.

De modo a demonstrar a modulação da ASE em si, os espectros do sinal adicionados à ASE modulada obtidos na saída do SOA para diferentes níveis de potência do sinal *pump* de entrada estão mostrados na Figura 4.20. Dois regimes são considerados: o regime de pequenos sinais; quando um sinal de *pump* em modo contínuo (CW) com -30 dBm é aplicado, e o regime de grandes sinais caracterizado por um sinal de *pump*, também CW, com -10 dBm. O espectro da ASE do dispositivo também foi incluído, para fins de comparação.

A razão de extinção do sinal convertido é obtida pela diferença entre os espectros de ASE-XGM medidos nos regimes de pequenos e de grandes sinais. Verificou-se assim uma razão de extinção máxima superior a 20 dB, em aproximadamente 1525 nm, para o comprimento de onda de *pump* de 1556 nm. As oscilações presentes nos regimes de pequenos e grandes sinais são devidas a reflexões em conexões imperfeitas.

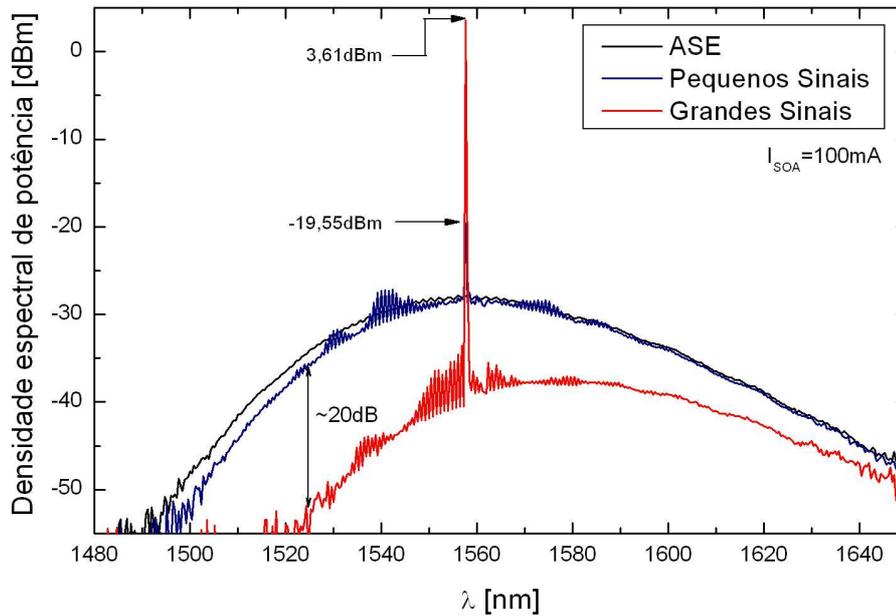


Figura 4.20: Espectros da ASE, grandes e pequenos sinais na saída do SOA sub-montado, com 100 mA de corrente de polarização.

Percebe-se da Figura 4.20 que a ASE é forçada para “baixo”, diminuindo sua densidade espectral de potência quando um sinal forte é aplicado no SOA, devido à depleção do ganho. Esta deformação é mais acentuada para comprimentos de onda menores que o *pump*, causando uma razão de extinção do sinal de saída mais elevada nesta região de comprimentos de onda.

A razão de extinção do sinal de saída pode ser vista na Figura 4.21, para corrente de polarização de 200 mA e razão de extinção de entrada de 25 dB. Nota-se uma forte degradação da razão de extinção de saída para comprimentos de onda maiores que o *pump* e a ocorrência de um valor máximo, de aproximadamente 27 dB, perto de 1520 nm.

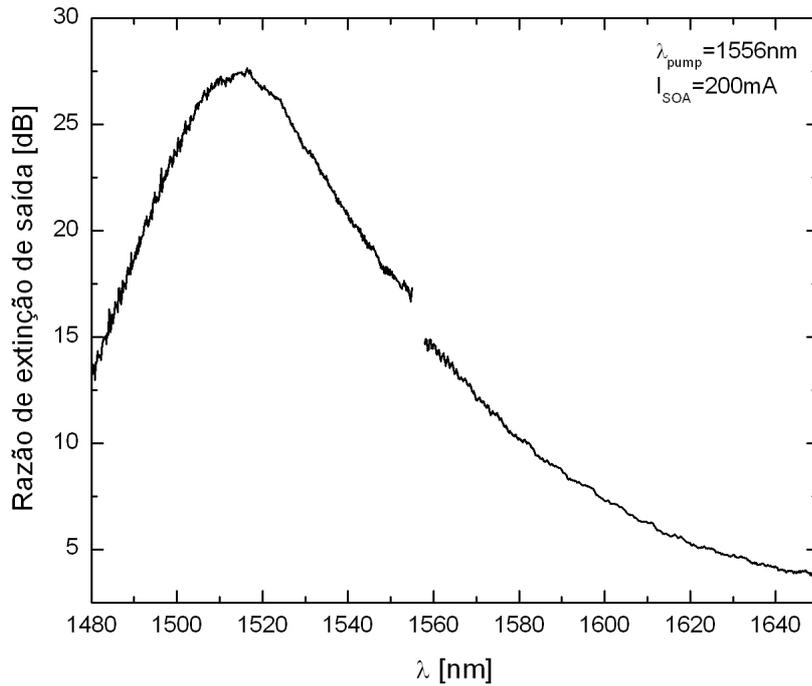


Figura 4.21: Razão de extinção do sinal convertido por ASE-XGM. SOA sub-montado, $I_{SOA} = 200 \text{ mA}$. $ER_{in} = 25 \text{ dB}$. Os pontos na vizinhança do *pump* foram intencionalmente retirados.

Percebe-se, da Figura 4.21, que o valor máximo de razão de extinção ocorreu para um valor de comprimento de onda menor que o do *pump*, dada a maior diferença entre as curvas de espectro de pequenos e grandes sinais.

Os espectros de ASE do SOA, para diferentes correntes de polarização na ausência de sinal estão mostrados no Apêndice A. Escolheu-se aqui a corrente de polarização de 200 mA para maximizar o ganho do SOA no comprimento de onda de *pump*. Para estas condições, o dispositivo apresentou ganho de pequenos sinais de 24 dB .

Um exemplo típico de conversão de comprimento de onda com a técnica de ASE-XGM para pulsos ópticos curtos de excitação está mostrado na Figura 4.22 [49] para um intervalo espectral de 16 nm , de 1548 nm a 1564 nm . Os pulsos ópticos de excitação são similares aos mostrados anteriormente na Figura 4.4, com 50 ps de FWHM e 1 GHz de taxa de repetição. A amplitude dos pulsos elétricos aplicados na entrada de RF e o ponto de polarização do modulador foram ajustados de forma a se obter uma razão de extinção máxima na entrada e na saída do SOA. A potência óptica média de entrada no SOA foi em torno de -20 dBm .

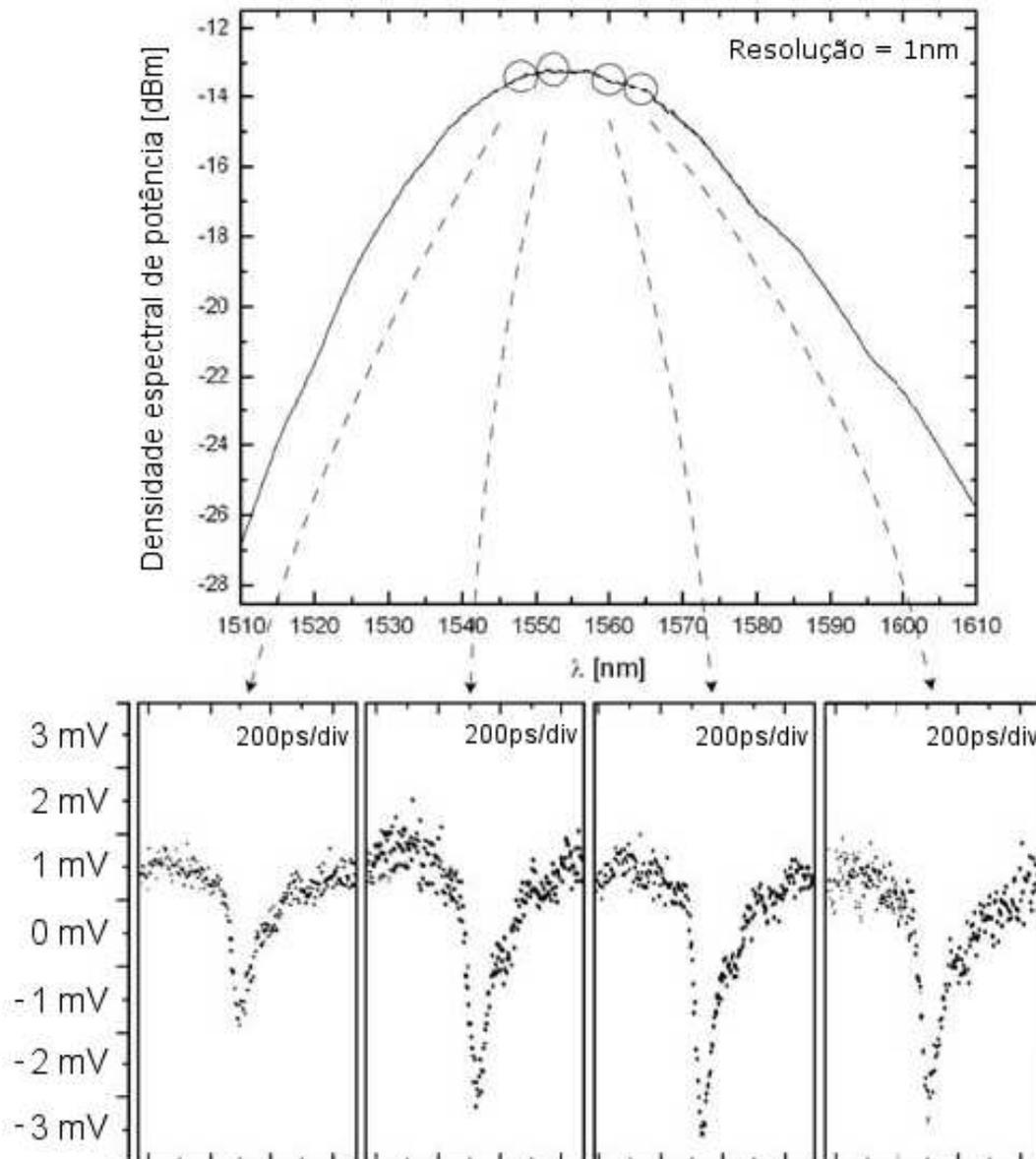


Figura 4.22: Espectro de ASE a 200 mA de corrente de polarização e fotos de pulsos convertidos para λ_{conv} de 1548, 1552, 1560 e 1564 nm. Potência de $pump = -20$ dBm, SOA sub-montado.

Os pulsos apresentam uma duração sempre superior à dos pulsos do $pump$, com durações em torno de 100 ps, devido à dinâmica de ganho do SOA. De acordo com a Figura 4.22, os pulsos de ASE-XGM têm duração em torno de 100 ps, permitindo taxas de transmissão de até 10 Gbit/s. É importante salientar que esses valores de duração de pulso são superiores aos obtidos pela técnica de $pump$ & $probe$, que estão entre 60 a 80 ps. Os pulsos convertidos em 1548, 1552, 1560 e 1564 nm e mostrados na Figura 4.22 foram analisados com o osciloscópio digital e apresentaram potência suficiente para detecção. Fora deste intervalo espectral a potência caiu drasticamente. Como a

eficiência de conversão desta técnica é praticamente constante neste intervalo espectral, a amplitude e a duração dos pulsos convertidos não dependem muito do comprimento de onda. A eficiência de conversão pode ser vista na Figura 4.23.

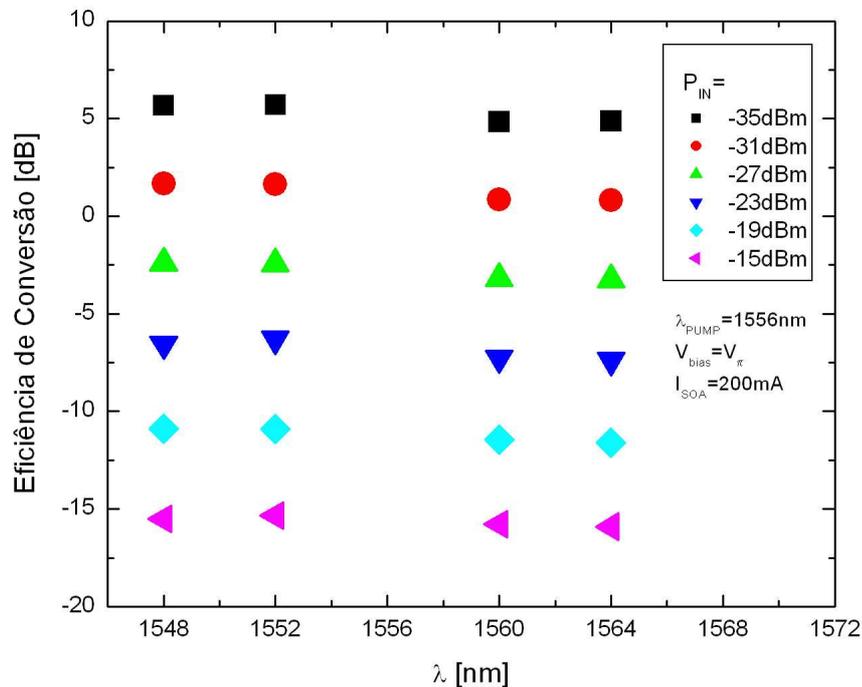


Figura 4.23: Eficiência de conversão em função do comprimento de onda do sinal convertido, para uma variação da potência do *pump*. SOA sub-montado, $I_{SOA} = 200 \text{ mA}$.

a) Variação de potência de *pump*

Foi investigado o comportamento dos pulsos convertidos em comprimento de onda com relação à potência do sinal de *pump* incidente no SOA. A Figura 4.24 mostra a variação da amplitude dos pulsos convertidos em função da variação da potência do *pump* e a Figura 4.25 mostra as durações correspondentes.

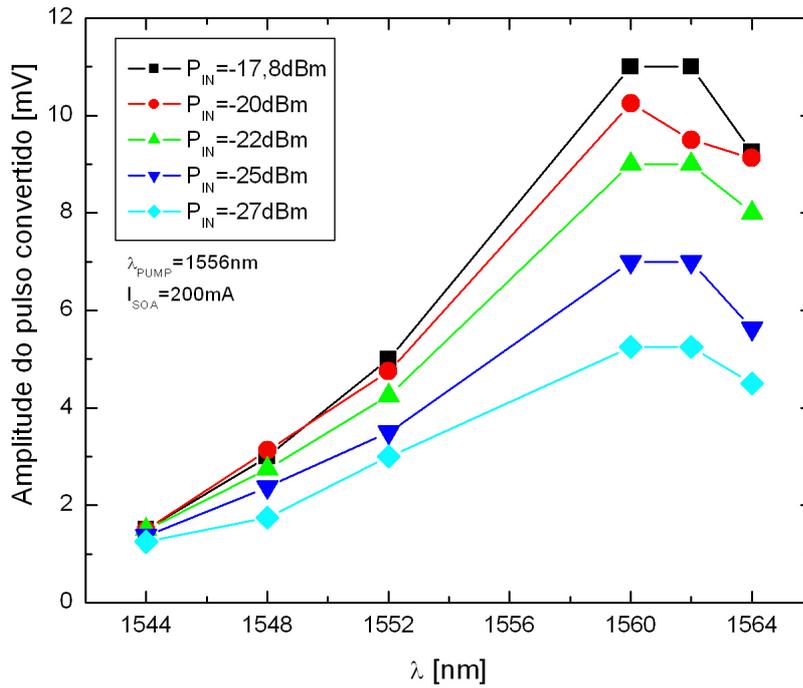


Figura 4.24: Amplitude de pulsos convertidos em função do comprimento de onda, para uma variação de P_{pump} . SOA sub-montado, $V_{bias} = V_{\pi}$.

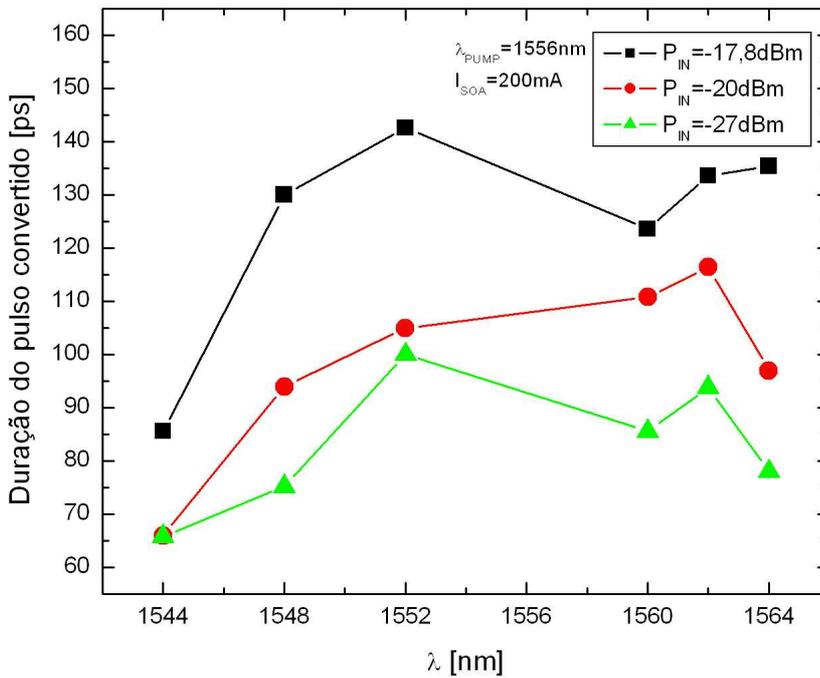


Figura 4.25: Duração de pulsos convertidos em função do comprimento de onda, para uma variação de P_{pump} . SOA sub-montado, $V_{bias} = V_{\pi}$.

De acordo com a Figura 4.24, verifica-se que na conversão utilizando o método da ASE-XGM, também se vê um aumento da amplitude dos pulsos com o aumento da potência de entrada; potência esta que, neste caso, é somente o *pump*. Isto se deve a um *compromisso* entre a potência de entrada e a ASE gerada: quanto maior a potência de entrada, menor será a ASE que o amplificador poderá criar. Ao reduzir a potência de ASE disponível, reduzir-se-á a potência de sinal convertido.

Adicionalmente, os valores de amplitude tendem a diminuir para os comprimentos de onda inferiores. Isto ocorre porque, apesar de uma razão de extinção mais elevada nesses comprimentos de onda, o valor da densidade espectral da ASE modulada é muito baixo, fazendo com que o sinal detectado seja pequeno.

Com relação às durações dos pulsos correspondentes, estas apresentam uma tendência a aumentar com a elevação da potência do *pump*. Este comportamento é o inverso daquele apresentado na técnica de *pump & probe*. Isto se deve às potências utilizadas serem maiores que a potência de saturação de entrada, causando uma “saturação” do efeito de modulação de ganho cruzado. Para a variação de comprimentos de onda, as durações apresentam uma tendência ao aumento para sinais com comprimento de onda maior que o do *pump*, que é devido às menores razões de extinção para esses comprimentos de onda.

4.2.3

Resultados experimentais para o SOA encapsulado

Os espectros de ASE do SOA encapsulado, para diferentes correntes de polarização na ausência de sinal estão mostrados no Apêndice A. Utilizando este amplificador, foram realizados experimentos análogos aos realizados com o SOA sub-montado, fazendo uso do mesmo diagrama de montagem, visto na Figura 4.19. Foram investigados os pulsos convertidos em comprimento de onda para variações de corrente de polarização do SOA, potência de *pump* e comprimentos de onda do *pump*. Os pulsos ópticos curtos de excitação usados na caracterização são os mesmos da Figura 4.4, com 50 ps de FWHM.

a) Variação de corrente de polarização do SOA

A corrente de polarização do SOA foi variada de modo a avaliar o impacto deste parâmetro no sinal convertido.

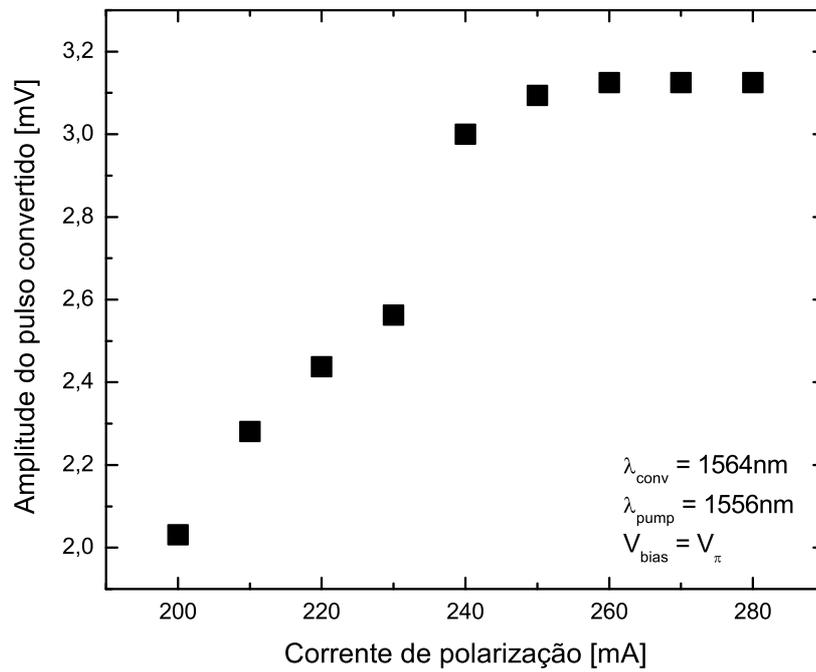


Figura 4.26: Amplitude de pulsos convertidos em função da corrente de polarização do SOA encapsulado. $V_{bias} = V_{\pi}$.

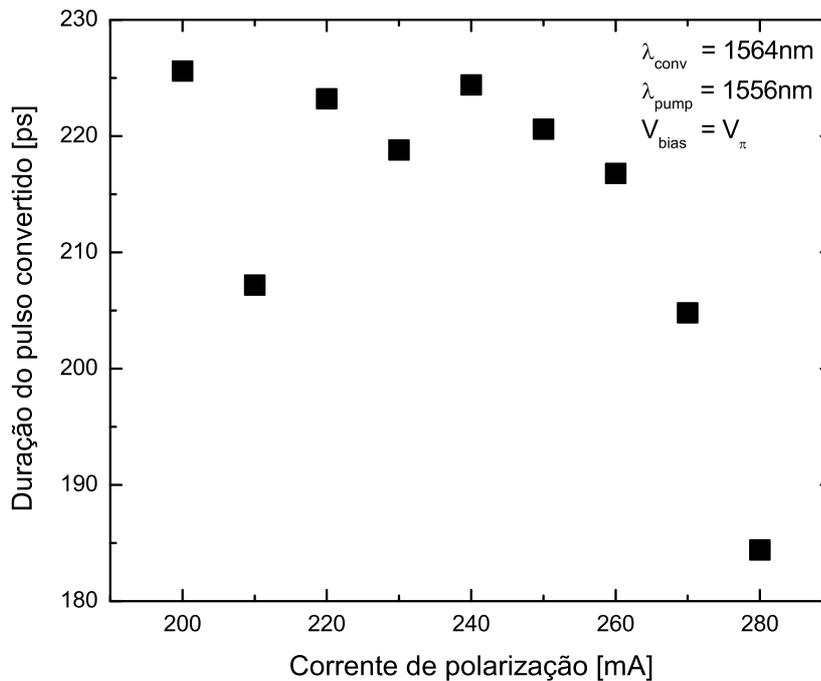


Figura 4.27: Duração de pulsos convertidos em função da corrente de polarização do SOA encapsulado. $V_{bias} = V_{\pi}$.

A amplitude dos pulsos novamente cresce com o a corrente de polarização do SOA; entretanto, neste caso, aparenta ter um limitante superior, o que sugere um comportamento do tipo saturação para a modulação da ASE. Acredita-se que isto se deve à auto-saturação do amplificador pela ASE [26], quando uma corrente elevada é aplicada.

A duração dos pulsos apresenta uma redução em seus valores quando aumenta-se a corrente do SOA, pelo aumento do ganho disponível que gera um maior número de fótons na região ativa, reduzindo o tempo de recuperação do ganho. Os valores para este teste, de 184 a 225 ps, são maiores que aqueles obtidos para o SOA sub-montado. Acredita-se que, por alguma razão desconhecida, a dinâmica de ganho deste amplificador é mais lenta.

b) Variação de potência de *pump*

É sabido da teoria (vide Capítulo 2) que a potência de entrada também é um parâmetro importante para um conversor de comprimentos de onda. Para tanto, montou-se um teste variando a potência do *pump*. Os gráficos resultantes estão mostrados nas Figuras 4.28 e 4.29, as amplitudes dos pulsos e as durações dos pulsos, respectivamente.

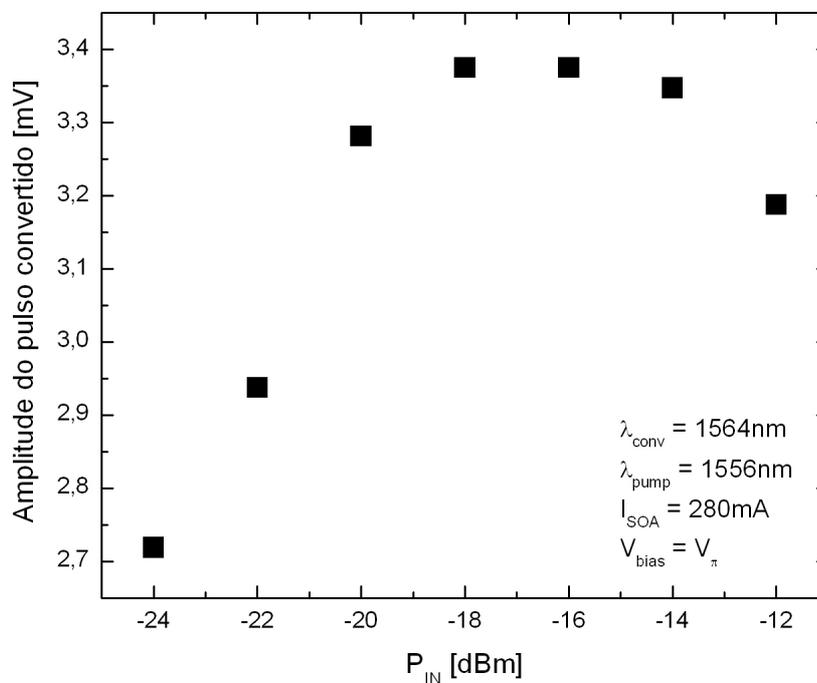


Figura 4.28: Amplitude de pulsos convertidos em função da potência de *pump*. SOA encapsulado, $V_{bias} = V_{\pi}$.

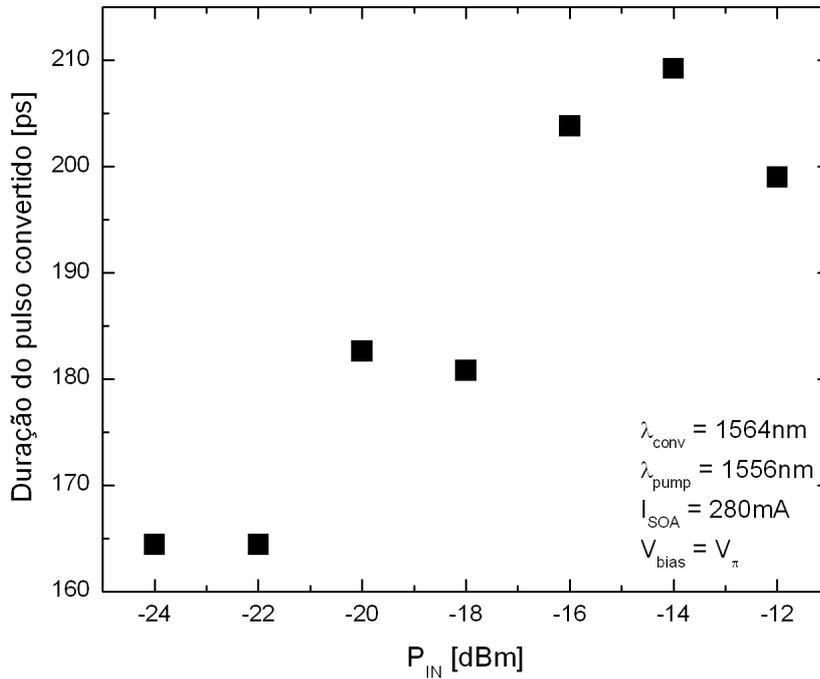


Figura 4.29: Duração de pulsos convertidos em função da potência de *pump*. SOA encapsulado, $V_{bias} = V_{\pi}$.

Para a variação da potência de entrada, este conversor parece apresentar um valor ótimo de potência que maximiza a amplitude do pulso convertido [11], pelo mesmo motivo que no método anterior: a modulação impressa no amplificador não é tão grande quanto para potências médias menores.

A duração dos pulsos aumentou com a potência, porque quanto mais altos os valores de potência, menor será a modulação impressa na ASE, dado o compromisso de potência de *pump* com a ASE; com isso, o amplificador é impedido de voltar da saturação quando não há pulso.

c) Razão de extinção estática

Para este último experimento, trocou-se o laser fixo por um sintonizável, de modo a variar o comprimento de onda do *pump*, enquanto manteve-se fixos os comprimentos de onda do sinal convertido, a potência de *pump* e a corrente de polarização do amplificador. Foi medida a razão de extinção estática, i.e., sem modulação, da ASE modulada neste amplificador em função do comprimento de onda. A Figura 4.30 mostra como as curvas de razão de extinção se comportam para uma variação do comprimento de onda de *pump*.

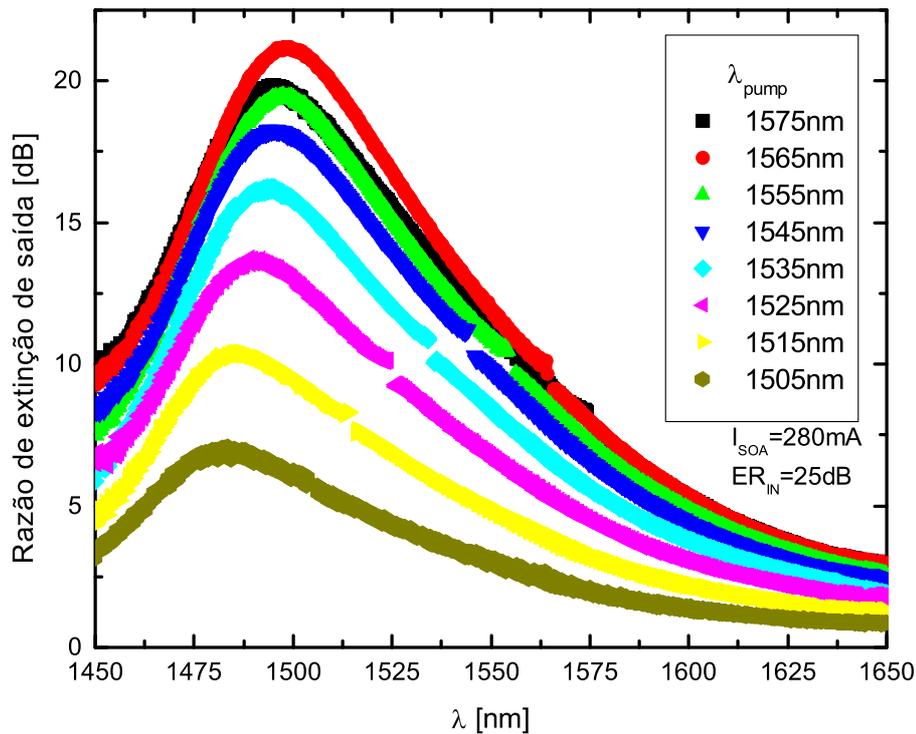


Figura 4.30: Razão de extinção de saída, em função do comprimento de onda, para uma variação do λ_{pump} , SOA encapsulado. Os pontos das curvas na vizinhança do λ_{pump} foram retirados.

Da Figura 4.30, percebe-se duas características: que o comprimento de onda de máximo da razão de extinção de saída se desloca para a direita com o aumento do comprimento de onda do *pump*, e, este valor de pico da razão de extinção aparenta ter um valor máximo para um comprimento de onda específico de *pump*. Para investigar este comportamento, a Figura 4.31 nos mostra a variação da diferença entre o comprimento de onda do *pump* e o comprimento de onda onde ocorre o máximo da razão de extinção, enquanto a Figura 4.32 ilustra a variação do valor de máximo da razão de extinção em função do comprimento de onda de *pump*.

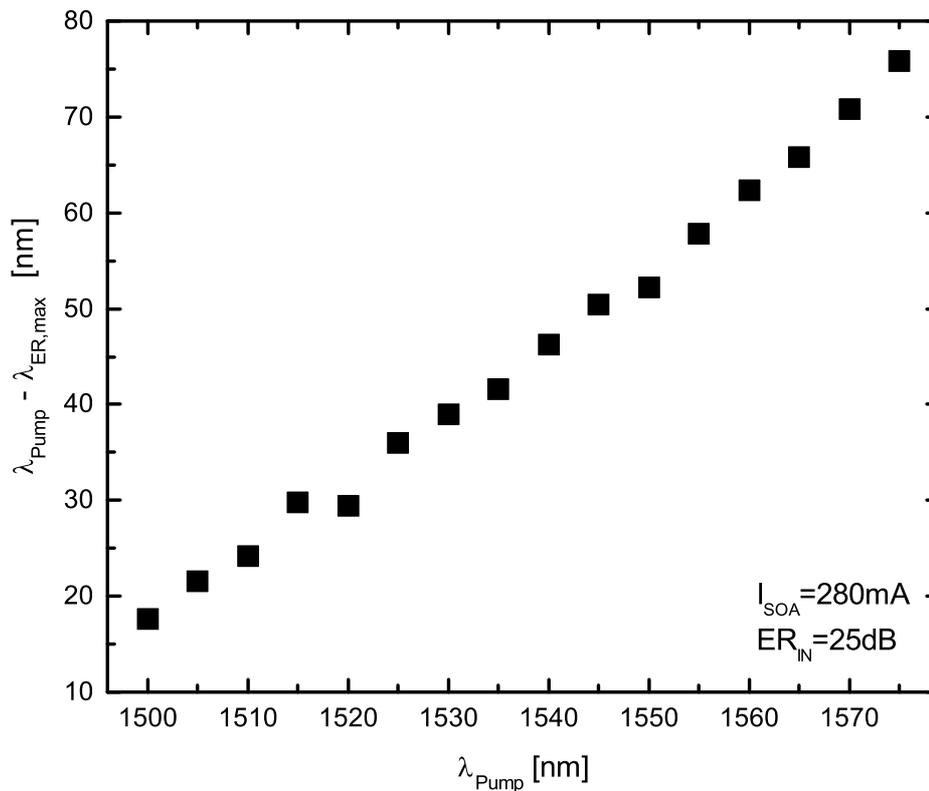


Figura 4.31: Diferença entre o comprimento de onda de *pump* e o comprimento de onda do máximo da razão de extinção de saída, em função do λ_{pump} .

Percebe-se da Figura 4.31 que a diferença entre os comprimentos de onda aumenta com o comprimento de onda de *pump* de uma maneira quase linear. Conforme esperado, o comprimento de onda que apresenta o máximo da razão de extinção, para um determinado comprimento de onda de *pump*, é menor que o comprimento de onda de *pump*, como pôde ser visto na Figura 4.30 e também, na Figura 4.31, dado que a diferença é positiva.

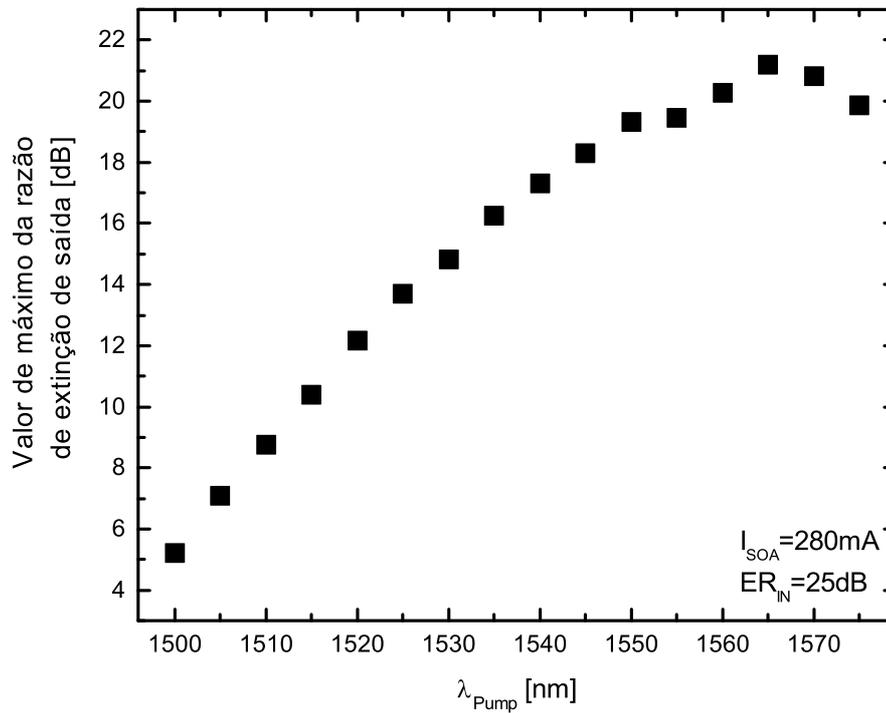


Figura 4.32: Valor de máximo da razão de extinção de saída em função do comprimento de onda de *pump*.

Para a Figura 4.32, vê-se que um máximo ocorre para o comprimento de onda de *pump* de 1565 nm . Pelo visto na Figura 4.31, este máximo ocorre para um comprimento de onda 66 nm abaixo do *pump*, em aproximadamente 1499 nm . Há uma redução no valor de máximo da razão de extinção para uma redução do comprimento de onda de *pump*, pois o ganho do dispositivo é menor nesta região do espectro, portanto, a modulação imposta na ASE também será menor, resultando em uma menor razão de extinção de saída.

4.3

Comparação entre as técnicas apresentadas

São comentados aqui os aspectos medidos das duas técnicas de conversão de comprimentos de onda apresentadas neste trabalho.

4.3.1

Amplitudes de pulsos

Comparando-se as amplitudes dos pulsos, verificou-se que, para o caso da técnica *pump & probe*, os pulsos tiveram maior amplitude que os pulsos convertidos pelo método ASE-XGM. Isto se deve ao fato da ASE tem densidade espectral de potência intrinsecamente menor que o sinal de *probe* amplificado.

Com relação às potências de entrada, as amplitudes dos pulsos convertidos pela técnica de *pump & probe* apresentaram uma relação direta com a potência de *probe*, enquanto que, para o método ASE-XGM a amplitude de sinal convertido apresentou um ponto de máximo para um valor de potência média de *pump* abaixo da potência de saturação de entrada. Para uma variação do comprimento de onda de sinal convertido, as curvas de amplitude para a técnica de *pump & probe* seguiram a curva de ganho; para a técnica ASE-XGM, as amplitudes apresentaram valores que não seguem a razão de extinção medida, aumentando para comprimentos de onda maiores. Isto ocorreu porque nesta região a potência óptica detectada foi maior.

4.3.2

Durações de pulsos

As durações de pulsos convertidos foram a característica mais importante levantada neste trabalho, pois estas limitarão a taxa máxima de repetição do sinal convertido.

Os pulsos obtidos através da técnica ASE-XGM apresentaram durações *sempre* maiores que aqueles pulsos convertidos pelo método *pump & probe*, pois são originadas de maneiras diferentes. Ainda, todos os pulsos registrados apresentaram durações maiores que os pulsos de excitação.

A *corrente de polarização*, em ambos os métodos foi determinante para a redução do tempo de recuperação do ganho, pois ao se aumentar a corrente, se aumenta o ganho e, portanto, o efeito. Para as *potências de entrada*, ambas as técnicas demonstraram forte dependência na duração dos pulsos, já que o tempo de recuperação de ganho é especialmente afetado pela quantidade de fótons na região ativa. Para a técnica *pump & probe*, um aumento na potência, seja de *pump* ou de *probe*, causou reduções nas durações dos pulsos; o oposto ocorreu para o método ASE-XGM, cujas durações só diminuiram quando a

potência de entrada foi reduzida. As durações dos pulsos se mostraram pouco dependentes do comprimento de onda do sinal convertido para a técnica *pump & probe*, pelo ganho saturado. Contudo, para o método ASE-XGM, as durações seguiram a variação da razão de extinção, sendo reduzidas para comprimentos de onda menores que o do *pump*.

4.3.2.1

Taxas máximas de conversão

A Tabela 4.1 apresenta os tempos mínimos dos métodos testados para os dois amplificadores empregados.

Tabela 4.1 Durações mínimas medidas de pulsos convertidos (aproximadas) para as técnicas e amplificadores considerados.

Técnica	<i>Pump & Probe</i>	ASE-XGM
SOA sub-montado	55 ps	66 ps
SOA encapsulado	76 ps	130 ps

Da Tabela 4.1, percebe-se que todos os pulsos foram mais longos que os pulsos utilizados na entrada do SOA, pelo tempo de recuperação de ganho maior que o tempo de “queda” do pulso. Contudo, os dois métodos demonstraram tempos de resposta que são compatíveis com a faixa de 10 Gbit/s.