4 Utilização de guias semicondutores em circuitos integrados no domínio do Gigabyte e Terabyte

O presente capítulo introduz as interfaces eletrônicas ultra-rápidas ativadas por meio de da "paralelização" de fluxos que adiciona custos e complexidade na realização de circuitos VLSI e apresenta as limitações das microlinhas em aplicações acima de 50 GHz. As conexões utilizando guias sobre substratos de SiGe e GaAS são apresentadas (denominadas de S-SIWG Semiconductor Substratre Integrated Wave Guide) e associadas ao formato de modulação QAM, destacando as aplicações destes dispositivos em conexões "chip-to-chip", "chip-to-module" e no interior dos "chips" em taxas do Gigabit e do Terabit. Estas aplicações indicam que estas conexões são uma importante alternativa principalmente em taxas da ordem do Terabit. Finalmente, a operação utilizando um único modo de propagação e sua geração através de adaptadores realizáveis nas tecnologias VLSI é avaliada.

4.1 Interfaces eletrônicas Ultra Rápidas

A computação de alta performance e novas aplicações estão atingindo o domínio do Terahertz. Algumas estimativas indicam que conexões entre CPUs e memórias deverão operar em taxas de 1 Terabyte. Interconexões utilizando linhas planares do tipo microstrip, stripline, CPWs, slotlines sobre substratos de SiGe, GaAS assim como as implementações CMOs SiCMOs, SiGeCMOS etc, têm apresentado penalidades severas acima de 50 GHz [4]. Estas limitações estão ocorrendo devido a atenuação, "cross-talk" e retardos verificados nesta faixa e em freqüências superiores.

Circuitos Integrados de altíssima velocidade estão sendo obtidos devido à dramática redução de suas dimensões e de avanços nas tecnologias VLSI. A integração de mais transistores em uma determinada área aumenta a capacidade de processamento. Entretanto, devido a conexões seriais de um numero maior de transistores, o retardo associado a operação

dos chips pode também sofrer uma limitação significativa. Atualmente, os severos problemas de retardo e roteamento no interior de um chip são parcialmente evitados através da paralelização dos fluxos de alta velocidade [31]. Como um exemplo, considere a aplicação do padrão IEEE 802.3ba e suas camadas de acesso ao meio físico. Para ajustar um fluxo de 100Gbit/s multiplexado bit a bit em 4 canais ópticos de 25Gbit/s, várias etapas de "paralelização" são ativadas incluindo a taxa de 644,53 Mbs através dos procedimentos indicados na Figura 36.



Figura 36 - Detalhes da arquitetura 100GBE IEEE802.3ba indicado uma redução de (1/160) para processar o fluxo em um "chip" FPGA [31,39].

Os guias semicondutores quando implementados na configuração SIWG podem constituir uma alternativa para evitar a excessiva paralelização dos fluxos seriais ultra-rápidos, e denominam-se como S-SIWG (Semiconductor Substrate Integrated Wave Guide). Entretanto, os guias de ondas apresentam comportamentos passa-alto sempre associados a frequências de corte de seus modos de propagação. Este comportamento difere do espectro passa-baixa dos fluxos digitais no formato NRZ e RZ, segundo indicado na Figura 37.



Figura 37 - Comportamento passa-baixo dos fluxos digitais NRZ e RZ (PRBS) atenuados pela resposta de freqüência típica de um guia de onda e seu comportamento passa-alto.

Entretanto, associando-se estes fluxos a formatos de modulações digitais 16-QAM, 64 QAM, BPSK etc, um comportamento passa-faixa pode ser obtido. Serão a seguir apresentados guias SIWG em semicondutores GaAs e SiGe com aplicações utilizando formatos de modulação digital. A nova solução proposta, apresentada na Figura 38, consiste em utilizar, o formato de modulação QAM, conversões de freqüências por meio de misturadores e guias dielétricos SIWG em semicondutores.



Figura 38 - Novo perfil das camadas MAC e PHY utilizando conexões seriais SIWG associados ao padrão 802.3ba.

A Tabela 3 apresenta a relação entre a taxa de bits transmitida pelo MAC Tx e a taxa de símbolos (blocos) na saída dos moduladores 16-QAM e 64-QAM. É possível observar que para as taxas de 100 Gbit/s a banda da saída do modulador de 16 QAM é reduzida para 25 GHz sendo possível sua transmissão através de um guia semicondutor centrado em 100 GHz (que será dimensionado e simulado no presente capítulo) assim como para as taxas inferiores.

PRBs (G bits/seg)	QAM – M	G Hz
400	16	100,00
400	64	66,67
100	16	25,00
100	64	16,67
40	16	10,00

40	64	6,67
10	16	2,50
10	64	1,67

Tabela 3 - Taxas de transmissão nos formatos de modulação digital QAM.

Na transmissão de 400 Gbits/s a banda da saída do modulador 16-QAM é de aproximadamente 100 GHz sendo portanto transmitida num guia S-SIWG na faixa do THz com banda de 200 GHz após passar pelo estágio de up converter conforme é apresentado na Figura 39. Da mesma forma, a banda de 50 GHz transmitida em verde, na figura 39, é referente ao caso da tabela 3 para a taxa de 100Gb/s modulado 16-QAM.



Figura 39 – Nova Tecnologia de conexão Inter-chip por meio de guias de ondas S-SIWG.

A configuração do modulador/demodulador 16 QAM pode ser implementada usando menos de 20 elementos ativos com células de Gilbert e divisores/combinadores integrados.

Os estágios de conversão "UP" e "DOWN" utilizarão também células de Gilbert de forma a implementar misturadores de alta frequência e o oscilador local poderá utilizar apenas 01 elemento ativo. A frequência de conversão será escolhida de acordo com a resposta

de frequências dos guias SIWG (Banda passante). Estes guias dielétricos são projetados para apresentarem faixas de frequências continuas de pelo menos 100% de banda .

É importante destacar que as camadas RS e PCS adotadas no padrão IEEE 802.3ba [38,39] e descritas no anexo 8, utilizam pelo menos 100000 elementos (componentes de eletrônica digital). Na nova solução estudada pela presente tese observa-se uma dramática redução do número de elementos ativos e passivos, assim como na redução do número de conectores, evidenciada devido à utilização de guias dielétricos com banda passante que permitem a serialização das conexões na taxa de transmissão de 100 Gb/s e futuramente Tbit/s.

Ao evitar-se a "paralelização" obtém-se uma solução extremamente simplificada e eficiente, implicando na redução do custo de fabricação e implementação.

4.2 Conexões utilizando configurações S-SIWG

O projeto de conexões seriais "inner/off – chip" por meio de soluções S-SIWG em GaAs e Silicio Germânio (SiGe) foi realizado utilizando o método da equivalência SIWG / RWG. Desta forma, as freqüências de corte dos modos TE10 , TE20 e TE01 do modelo RWG e as características do modelo 3D do SIWG foram consideradas. As bandas consideradas no projeto foram (50-150) GHz e (0.3-1.6) THz e estão associadas ao padrão IEEE 802.3ba / 100GBs e as futuras aplicações Gigabit Ethernet. Simulações 3D eletromagnéticas utilizando a ferramenta computacional HFSS foram implementadas a partir das dimensões de projeto.

4.2.1 Implementação em Substrato de Arseneto de Gálio (GaAs).

O guia S-SIWG realizado no Arseneto de Gálio (GaAs) é modelado de acordo com o método da equivalência SIWG / RWG. Foram avaliadas a perda de inserção por milímetro considerando as vias metalizadas com diferentes tipos de metalização e as respostas de freqüência. A

Tabela 4 indica as dimensões do SIWG em GaAs e as perdas de inserção (S_{21} dB/mm) para as metalizações em cobre, ouro, alumínio e PEC (Perfect electric conductor). A Figura 41 e a Figura 42 apresentam as características de transmissão e reflexão respectivamente nas bandas de (40 – 160) GHz e (0.3 – 1.6) THz para a metalização em ouro. Em ambos os resultados a perda de inserção é continua, de aproximadamente 0dB, em toda a banda A perda de reflexão em ambos os casos, também está satisfatória. Desta forma, pode-se afirmar que este tipo de estrutura, S-SIWG, é uma excelente aplicação a sinais com banda de 100GHz ou 400GHz como será apresentado ao longo do capítulo.



Figura 40 - GaAs-SIWG ; (a) Modelo 3D; (b) modelo RWG equivalente.

SIWG - GaAs (Er= 12.85) (tg perdas = 0.0006)		
50 GHz a 150 GHz / H=bulk (217 um)		300 GHz - 1.5 THz H=30um
λ TE10 / freq TE10	1.67 mm / 50 GHz	0.24 mm / 348 GHz
λ TE 20 / freq TE20	0.83mm / 100 GHz	0.12 mm / 696 GHz
λ TE 01 / freq TE01	0.4 mm / 209.08 GHz	0.06mm / 1.39 THz
Altura / espessura do dielétrico (H = b)	0.20 mm (200 um)	0.030 mm (30 um)
a/b	4.15	4
distância (a) na direção x centro a centro das vias que formam a parede do guia	aRWG= 0.83 mm	aRWG = 0.12 mm (120)
	(830 um)	um)
	aSIWG = aRWG+(1.3*r)	aSIWG = aRWG+(1.3*r)
	0.9275	0.133
distância (p) na direção Z centro a centro das vias que formam a parede do guia	0.2 mm (200 um)	0.03 mm (30 um)
Diametro das vias que formam a parede do guia (d)	0.15 mm (150 um)	0.02 mm (20 um)
d/p	0.75	0.666666667
d/a	0.180722892	0.166666667
raio das vias que formam a parede do guia (r)	0.075 mm (75 um)	0.01 mm (10 um)
espaço (tangente) entre as vias da parede do guia	0.05 mm (50 um)	0.01 mm (10 um)
Comprimento total do guia SIWG / qnte de vias em 1 linha paralela (1 parede)	9.953 mm / 50 vias	0.95 mm / 32 vias

retardo	0.11897 ns	11.3592 ps
S (21) dB/mm vias metalizadas com Cobre	0.071 dB/mm	0.989 dB /mm
S (21) dB/mm vias metalizadas com Alumínio	0.082 dB/mm	1.173 dB /mm
S (21) dB/mm vias metalizadas com Ouro	0.080 dB/mm	1.137 dB / mm
S (21) dB/mm vias metalizadas com PEC	0.025 dB/mm	0.199 dB / mm

Tabela 4 - Dimensões do GaAs-SIWG para aplicações de 50 GHz a 150 GHz e também 300 GHz a 1.5 THz.



Figura 41 - Resposta em freqüência para a perda de retorno e a perda de inserção do modelo do guia GaAs – SIWG comparado com o respectivo modelo RWG na faixa de 50 GHz a 160 GHz.



Figura 42 - Resposta em freqüência para a perda de retorno e a perda de inserção do modelo do guia GaAs – SIWG comparado com o respectivo modelo RWG na faixa de 0.5 THz a 1.6 THz.

4.2.2 Implementação em Substrato de Silicio Germânio (SiGe)

O dispositivo realizado no "bulk" de silício é modelado pelo método da equivalência SIWG / RWG, conforme é apresentado na Figura 43. A

Tabela 5 apresenta as dimensões do guia para aplicações de 50 GHz a 150 GHz assim como de 300GHz a 1.5 THz. Considerando que as vias metalizadas podem ser realizadas com diferentes tipos de metalizações, uma simulação 3D Eletromagnética é realizada no HFSS [19] de forma a avaliar a perda de inserção por milímetro em cada caso, isto é , o valor de S_{21} (dB/mm) na freqüência central da banda do guia, podendo assim escolher o tipo de metalização que oferece a menor perda por milímetros de guia.



Figura 43 - SiGe-SIWG (a) Modelo 3D EM ; (b) modelo RWG equivalente

SIWG - Si (Er=11.9) (tg perdas=0.001)		
	50 GHz a 150 GHz / H=bulk	300 GHz - 1.5 THz
λ TE10 / freq TE10	1.73 mm / 50 GHz	0.24mm / 362 GHz
λ TE 20 / freq TE20	0.869mm / 100 GHz	0.12mm / 724 GHz
λ TE 01 / freq TE01	0.434mm / 200 GHz	0.06mm / 1.45 THz
Altura / espessura do dielétrico (H = b)	0.217 mm (217 um)	0.030 mm (30um)
a/b	4	4
	aRWG= 0.869 mm	aRWG = 0.120 mm
distâncie (a) an dimerio a contra dan sien and	(869 um)	(120 um)
distancia (a) na direção x centro a centro das vias que	aSIWG =	aSIWG =
formam a parede do guía	aRWG+(1.3*r) =	aRWG+(1.3*r) =
	0.9665	0.107
distância (p) na direção Z centro a centro das vias que formam a parede do guia	0.2 mm (200 um)	0.03 mm (30 um)
Diametro das vias que formam a parede do guia (d)	0.15 mm (150 um)	0.02 mm (20 um)
d/p	0.75	0.6666666667
d/a	0.172612198	0.166666667
raio das vias que formam a parede do guia (r)	0.075 mm (75 um)	0.01 mm (10 um)
espaço (tangente) entre as vias da parede do guia	0.05 mm (50 um)	0.01 mm (10 um)
Comprimento total do guia SIWG / qnte de vias em 1 linha paralela (1 parede)	9.953 mm / 50 vias	0.95 mm / 32 vias
Retardo	0.1144909 ns	10.9312 ps
Etapa de simulação no HFSS considerando somente diferentes metalizações das vias sendo as paredes superiores e inferiores PEC		
S (21) dB /mm vias metalizadas com Cobre	0.078dB/mm	1.102 dB/mm
S (21) dB / mm vias metalizadas com Aluminio	0.088 dB / mm	1.286 dB/mm
S (21) dB / mm vias metalizadas com Ouro	0.086 dB / mm	1.251 dB/mm
S (21) dB / mm vias metalizadas com PEC	0.037 dB / mm	0.329 dB/mm

Tabela 5 - Dimensões do SiGe-SIWG nas bandas de 50-150 GHz e de (0.3-1.5) THz

4.2.3 Avaliação do SiGe - SIWG na faixa de freqüência de (40-160) GHz

Nesta etapa é realizada a simulação Eletromagnética 3D no domínio da freqüência do guia SIWG com as vias metalizadas em ouro, usando um bulk de silício com altura de 217 um. A Figura 44 apresenta a perda de inserção $S_{21}(dB)$ e a perda de retorno $S_{11}(dB)$ em toda a banda de 40 GHz a 160 GHz, comparado com o modelo RWG equivalente. Com este resultado é possível observar que a perda de inserção é inferior a 1dB em toda a banda.



Figura 44 - Resposta em freqüência para a perda de inserção e perda de retorno do modelo do guia SiGe-SIWG comparado com o respectivo modelo RWG na faixa de 40 GHz a 160 GHz.

Entretanto é necessário realizar uma análise dos modos excitados no guia sem conectorização. Desta forma a simulação 3D EM do HFSS considerou a avaliação de 3 modos nas portas do guia. A Figura 45 apresenta o resultado de simulação da perda de inserção $S_{21}(dB)$ para os 3 modos. Observa-se que neste caso o modo 1, TE10, é excitado e possui a freqüência de corte em 50 GHz. O modo 2, TE20, também excitado apresenta a freqüência de corte em aproximadamente 100 GHz ; o modo 3, TE01, é excitado apenas acima de 150 GHz.



Figura 45 - Modos excitados no guia SiGe-SIWG sem transição na banda de 50 GHz a 160 GHz.

A Figura 46 apresenta a distribuição do campo Eletromagnético nas portas do guia SiGe-SIWG. Em (a) observa-se a distribuição de campo do modo TE10. Em (b) observa-se a distribuição de campo do modo TE20 e em (c) a distribuição de campo do modo TE01.



Figura 46 - Distribuição do campo eletromagnético nas portas do guia SiGe-SIWG; (a) TE10 ; (b) TE20 ; (c) TE01

Deve ser observado que, quando um modelo de guia SIWG é realizado, as estruturas de acoplamento podem excitar os três modos indicados na Figura 46 de forma simultânea. Resulta então que estes modos se adicionam com fases aleatórias e comprometem a resposta de freqüência do guia. A interferência entre os modos pode ser evitada quando as configurações de entrada e saída são construídas associadas ao modo TE10 e seu campo elétrico transversal apresentar simetria.

4.2.4 Avaliação das Perdas em configurações SIWG e linhas microstrip

A Figura 47 apresenta o resultado da Atenuação em dB/mm por meio da simulação de parâmetros S realizado no ADS [17] de linhas microstrip metalizada com ouro e níquel, comparado com o resultado da simulação 3D EM no HFSS para o modelo do guia SiGe-SIWG com as vias metalizadas em ouro. Com este resultado é possível afirmar que aplicações com guias de ondas possuem melhores respostas na faixa de 100 GHz. Verifica-se que a perda de inserção da configuração microstrip é significativamente superior a perda apresentada pelo SIWG. O melhor desempenho do SIWG é devido à redução da perda no condutor pois os modos excitados propagam-se no interior do guia. As configurações microstrip são ativadas por meio de correntes elétricas nos seus condutores e são penalizadas devido ao efeito pelicular.



Figura 47 - Resposta em freqüência de simulação e comparação com referências bibliográficas [33] da linha microstrip no "bulk" de silício comparado com o guia SiGe-SIWG na faixa de (70-160) GHz

Simulações idênticas considerando de forma cuidadosa as perdas no dielétrico e nos condutores foram realizadas para o SIWG sobre SiGe na faixa de (0.5 – 1.5) THz. Utilizando vias metalizadas em ouro. Evidencia-se que as linhas de transmissão microstrip apresentam uma atenuação em dB/mm significativamente superior as soluções SIWG. A Figura 48 apresenta a comparação entre as perdas no SIWG e na microstrip. A Figura 49 apresenta a simulação eletromagnética de um guia SIWG e modelo equivalente RWG no bulk do semicondutor de Silício com comprimento total de 0,95 mm e as vias metalizadas em ouro, na mesma faixa do THz indicada. Estes resultados ilustram a possibilidade de utilizarem estas estruturas no interior de "chips" e entre "chips" em substituição aos atuais barramentos de microlinhas, difíceis de operar na taxa do THz.



Figura 48 - Atenuação em dB/mm de uma linha microstrip e de um guia em bulk de silício na faixa de freqüências de (0.5-1.5) THz.



Figura 49 - Resposta em freqüência da simulação Eletromagnética 3D do SiGe-RWG na faixa de frequências de (0.2-1.6) THz Comparada com o modelo RWG.

4.3 Excitação de conexões SIWG por meio de adaptadores Coaxial – SIWG

Tendo em vista a realização futura de guias S-SIWG em substratos de SiGe em "foundries" especializadas, torna-se importante avaliar as conexões por meio da medição da perda de inserção e da perda de retorno, isto é, os parâmetros S_{21} e S_{11} em sistemas com impedância característica de 50 Ω . Como a tecnologia de SiGe permite a realização de furos metalizados, configurações de entrada e saída tipo coaxial 50 Ω são avaliadas. Este tipo de solução apresenta-se extremamente atraente devido a adaptação das dimensões físicas e as aplicações envolvidas. Deve ser destacado que esta configuração pode ser utilizada no interior de "chips" inclusive em conexões entre elementos ativos.

A Figura 50 e a Figura 51 Apresentam o modelo 3D do guia SiGe-SIWG excitado por uma transição coaxial simulado de acordo com as dimensões da Tabela 6 de forma a possibilitar a máxima transferência de potência em uma banda larga centrada em 100 GHz. Para isso os cálculos foram realizados de acordo com a sessão 2.3 do capítulo 2. O coaxial de 50 Ω é realizado com SiGe de altura de 30um supondo que a camada acima do bulk possui uma espessura de 30um.

SIWG - Si (Er=11.9) (tg perdas=0.001)	
	50 GHz a 150 GHz / H=bulk
λ ΤΕ10 / freq ΤΕ10	1.73 mm / 50 GHz
λ TE 20 / freq TE20	0.869mm / 100 GHz
λ TE 01 / freq TE01	0.434mm / 200 GHz
Altura / espessura do dielétrico (H = b) calculada	0.217 mm (217 um)
a/b	4
	aRWG= 0.869 mm (869
distância (a) na direção x centro a centro das vias que formam a	um)
parede do guia	aSIWG =
pulodo do guid	aRWG+(1.3*r) =
	0.9665
distância (p) na direção Z centro a centro das vias que formam a parede do guia	0.2 mm (200 um)
Diametro das vias que formam a parede do guia (d)	0.15 mm (150 um)
d/p	0.75
d/a	0.172612198
raio das vias que formam a parede do guia (r)	0.075 mm (75 um)
espaço (tangente) entre as vias da parede do guia	0.05 mm (50 um)
Comprimento total do guia SIWG / qnte de vias em 1 linha paralela (1 parede)	4,75 mm / 24 vias

Retardo	61.5604 ps	
Etapa de simulação no HFSS para a transição coaxial guia SIWG		
tamanho total do substrato em Z	5.35 mm	
Altura do coxial 50 Ω	30 um	
Diametro central do coaxial	3 um	
diametro externo do coaxial	53.49 mm	
tamanho d do conector dentro do guia	0.2035 mm	
distacia entre a ponta do coaxial e a parede inferior do guia de forma q o coaxial não toque no guia	H/16	
Impedância de onda do guia calculada	217.5242 Ω	
distancia do coaxial a parede do guia RWG	0.217 mm (217 um)	
distancia entre 2 coaxiais (TX e RX)	4.316 mm	

Tabela 6 - Dimensões do guia SiGe - SIWG com a transição coaxial /SIWG.

A Figura 50 apresenta o modelo 3D vista em corte longitudinal do guia SiGe-SIWG com uma das portas da transição coaxial em detalhes.



Figura 50 - Modelo da Transição guia SiGe-SIWG coaxial 50Ω. O trecho coaxial de 30um indicado acima está localizado no interior de uma camada de SiGe com esta espessura.

A Figura 51 apresenta o modelo 3D do guia SiGe-SIWG com as respectivas dimensões calculadas.



Figura 51 - Modelo 3D EM do guia SiGe-SIWG com a transição coaxial de 50 Ω

Para obter uma análise dos modos excitados no guia, a simulação 3D EM no HFSS considerou a ativação dos 3 modos principais nas portas do coaxial. A Figura 52 Apresenta o resultado da simulação da perda de inserção $S_{21}(dB)$ para os 3 modos. Observa-se que neste caso o modo 1, TE10, é excitado e possui a freqüência de corte em aproximadamente 50 GHz. O modo 2, TE20 e o modo 3, TE01, são excitados com níveis de potência extremamente reduzidos, sendo possível observar que a potência do sinal de entrada esta quase totalmente concentrada no modo TE10.



Figura 52 - Modos excitados no guia SiGe-SIWG com transição coaxial de 50 Ω na banda de 50 GHz a 150 GHz.

A "não excitação" dos modos superiores resultou de uma cuidadosa avaliação dos parâmetros geométricos e da simetria obtida entre os "probes" coaxiais, sendo um resultado importante que garantiu o alargamento das bandas passantes envolvidas.

A Figura 53 apresenta a distribuição do campo Eletromagnético nas portas do coaxial. Em (a) observa-se a distribuição de campo na porta 1 referente ao coaxial 1 (probe 1). Em (b) observa-se a distribuição de campo na porta 2 referente ao coaxial 2 (probe 2).



Figura 53 - Distribuição do campo eletromagnético nos probes coaxial de 50Ω do guia SiGe-SIWG.

A Figura 54 apresenta a perda de inserção $S_{21}(dB)$ e a perda de retorno $S_{11}(dB)$ em simulado de 40 GHz a 160 GHz para o modo dominante. Neste caso a banda de transmissão está em 80 -140 GHz centrada em 110 GHz com perda de inserção de 1 dB, a perda de retorno está satisfatória em toda a banda.



Figura 54 - Resposta em freqüência para a perda de inserção e perda de retorno do guia SiGe-SIWG com transição coaxial de 50Ω

A Figura 55 Apresenta a simulação da resposta de fase do guia SiGe-SIWG com transição coaxial. Observa-se que a fase possui comportamento linear em toda a banda passante do guia indicando portanto sua aplicabilidade para a transmissão de sinais digitais modulados. O retardo resultante desta mesma estrutura pode ser também avaliado. A Figura 56 apresenta um retardo de grupo constante de 0,6 E-10 seg, isto é 60 ps (pico segundos)



Figura 55 - Comportamento de Fase do SiGe - SIWG com transição coaxial de 50 Ω



Figura 56 - Comportamento de retardo de grupo do SiGe -SIWG com transição coaxial de 50 Ω

4.4 Conexões de sinais digitais utilizando módulos SIWG na taxa de 100 Gbit/s em substratos semicondutores

No inicio do presente capítulo foi indicado que a incompatibilidade entre o comportamento passa-alto dos guias de onda e as características passa-baixo dos fluxos digitais NRZ e RZ podem ser superadas por meio de formatos de modulação QAM, BPSK, DPSK etc. Considerando então um fluxo digital NRZ na taxa de 100Gbits/s modulado no formato 16QAM, um sinal com banda de 25 GHz será obtido. Este sinal pode ser convertido para a freqüência central de uma portadora de 110 GHz e transferido para outro ponto do "bulk" semicondutor de silício através de um SIWG. As características de fase linear e retardo de grupo constante obtidas na simulação do SIWG na faixa de (40 – 160) GHz apresentadas nas Figura 55 e Figura 56, indicam que este dispositivo pode transportar o sinal QAM / 25 GHz na portadora de 110 GHz sem sofrer distorções.

Dois misturadores balanceados são utilizados como elementos de "*up and down converter*" respectivamente de forma que o sinal esteja centrado na portadora de 110 GHz que é aproximadamente a freqüência central do guia com a transição coaxial de 50Ω. A

portadora é gerada por um oscilador local e dividida para os 2 mixers de forma a manter o sincronismo. A Figura 57 apresenta um setup proposto para a da transmissão de um sinal de 100 Gbits/s modulado via 16QAM através de um guia SiGe-SIWG incluindo os estágios de "up" e "down converter", simulado no HFSS.



Figura 57 - Setup de simulação para teste da transmissão de um sinal de 100Gbits/s modulado via 16QAM através de um guia SiGe-SIWG incluindo os estágios de "up" e "down converter".

O espectro do sinal na entrada e na saída do guia é avaliado de forma a observar o sinal transmitido no SiGe-SIWG, sendo este resultado de simulação apresentado na Figura 58. É possível observar a perda de inserção de 3 dB do guia, entretanto não ocorrem mudanças significativas na banda do sinal transmitido. O desempenho da transmissão do sinal digital é avaliada por meio do diagrama de olho. A Figura 59 apresenta o diagrama de olho medido indicando BER excelente.



Figura 58 - Espectro simulado para a transmissão do sinal digital PRBS 25Gbit/s; em laranja o sinal na entrada do guia e em vermelho o sinal na saída do guia.



Figura 59 - Diagrama de olho para a transmissão do sinal PRBS 25 Gbits/s transmitido no guia SiGe-SIWG.

4.5 Comentários

No presente capitulo, inicialmente são introduzidas as penalidades que os circuitos VLSI sofrem devido à alta densidade de integração e aos retardos resultantes deste tipo de configuração. São também introduzidas nesta etapa as perdas e "cross-talk" verificadas nas configurações de microlinhas acima de 50 GHz. Em seguida é descrita a idéia de "paralelização" dos fluxos NRZ e RZ em velocidades muito elevadas, utilizada para possibilitar a divisão destes fluxos e a redução da velocidade de processamento no interior dos circuitos VLSI. Um exemplo de paralelização indicando seu custo e sua complexidade é apresentado. Em seguida, as configurações utilizando guias S-SWIG em substratos de GaAS e SiGe são simuladas, associadas ao formato de modulação QAM. Estas configurações são avaliadas como alternativas a utilização de microlinhas e a paralelização. Dentre os resultados importantes podem ser destacados a avaliação do espectro de fase e do retardo de grupo dos S-SIWG e a avaliação e simulação das configurações nas quais a quase totalidade da potencia é propagada nos guias através unicamente do modo TE10 por meio de um tipo de adaptador guia-coaxial utilizando furos metalizados, extremamente convenientes para realização por meio das tecnologias de integração VLSI, sendo uma contribuição inovadora deste trabalho de tese.

Deve então ser ressaltado que este capítulo apresenta a utilização de guias dielétricos em SiGe e GaAs, denominadas de S-SIWG (Semiconductor Substrate Integrated Wave guide) para o desenvolvimento de conexões de ondas guiadas inter chip e intra-chip destacando as aplicações em sistemas digitais associados ao novo padrão Gigabit Ethernet 802.3ba em 100Gbps e futuras aplicações na faixa de (0.3-1.5) Terahertz.