

5 Protótipo de guia de onda operando na faixa de frequências de (15 – 60) GHz

Este capítulo apresenta inicialmente o desenvolvimento, a realização e a medição de um protótipo de guia de onda em um substrato de constante dielétrica de $\epsilon_r=10$, cujo valor é aproximadamente o valor da constante dielétrica do SiGe e do GaAs. Outro projeto e realização utilizando o substrato semiconductor de SiGe é apresentado. A faixa de frequência de (10-60) GHz é utilizada nos dois projetos devido dificuldades de realização e conectorização. Os resultados obtidos são apresentados e avaliados.

5.1 R6010 –SIWG

Considerando o substrato Rogers 6010 cuja constante dielétrica é de 10.2 e as perdas dielétricas associadas possuem valor de $\tan \delta = 0.0023$, um guia SIWG foi calculado, projetado, e realizado para operar na banda de 15 GHz a 60 GHz. A Tabela 7 apresenta as dimensões e os valores do guia fabricado. A transição microstrip foi dimensionada para a utilização de conectores SMA que operam na faixa de microondas até 40 GHz [41]. As transições entre os conectores coaxiais 50 Ω especificados para operar até pelo menos 40 GHz foram implementadas através de transformadores desenvolvidos para esta aplicação. Estes transformadores são ativados através de transições microstrip com alargamento gradual da sua largura. Suas dimensões foram avaliadas através da ferramenta computacional ADS e HFSS.

SIWG R6010 ($\epsilon_r=10.2$) (tg perdas=0.0023)	
Prototipo de 15 a 60 GHz	
λ TE10 / freq TE10	6.2579 mm / 15 GHz
λ TE 20 / freq TE20	3.13 mm / 30 GHz
λ TE 01 / freq TE01	1.269 mm / 73.91 GHz
Altura / espessura do dielétrico (H = b)	0.635 mm
razão a/b	4.929 mm

distância (a) na direção x centro a centro das vias que formam a parede do guia	aRWG= 3.13 mm
	aSIWG = aRWG+(1.5*r)
	3.655 mm
distância (p) na direção Z centro a centro das vias que formam a parede do guia	1.15 mm
Diâmetro das vias que formam a parede do guia (d)	0.7 mm
raio das vias que formam a parede do guia (r)	0.35 mm
espaço (tangente) entre as vias da parede do guia	0.45 mm
quantidade de vias da parede na direção Z	15
Comprimento total do guia SIWG / qnte de vias em 1 linha paralela (1 parede)	16.8 mm
Retardo do guia calculado	0.17897 ns
comprimento do trecho de linha microstrip + transição	2* (4.1 mm)
l _{trm} = comprimento em Z do taper de melhor S ₂₁ = comprimento de onda na microstrip/4 em 15 GHz	1.85852 mm
base triang = comprimento em x que forma a base do taper (transição guia)	2.13 mm
comprimento total do protótipo na direção Z	25 mm
largura total do prototipo na direção X	10 mm
Etapa de simulação no HFSS considerando agora a espessura de metalização superior e inferior a mesma da microstrip na frequência de corte TE ₁₀ . Estes resultados incluem os 2 trecho de linha microstrip	
w (largura) linha microstrip	0.6 mm
T (espessura) metalização microstrip	0.035 mm
Atenuação em db dos trecho de linha microstrip considerando 4.1 mm de linha em 15 GHZ	0.0124 dB/mm em 15 GHz 0.0224 dB/mm em 30 GHz 0.014 dB/mm em 60 GHz
SkinDepth dos 2 trechos microstrip	3.79 E-4 / 30 GHz 5.36 E-4 / 15 GHz
S (21) SimuladodB /mm em toda a banda 15 a 60 GHz	0.05 dB/mm

Tabela 7 - Dimensões do protótipo do guia no substrato Roger 6010.

O protótipo foi simulado e dimensionado de acordo com o método da equivalência RWG x SIWG, primeiramente sem transição e sem conectorização conforme é apresentado na Figura 60 .

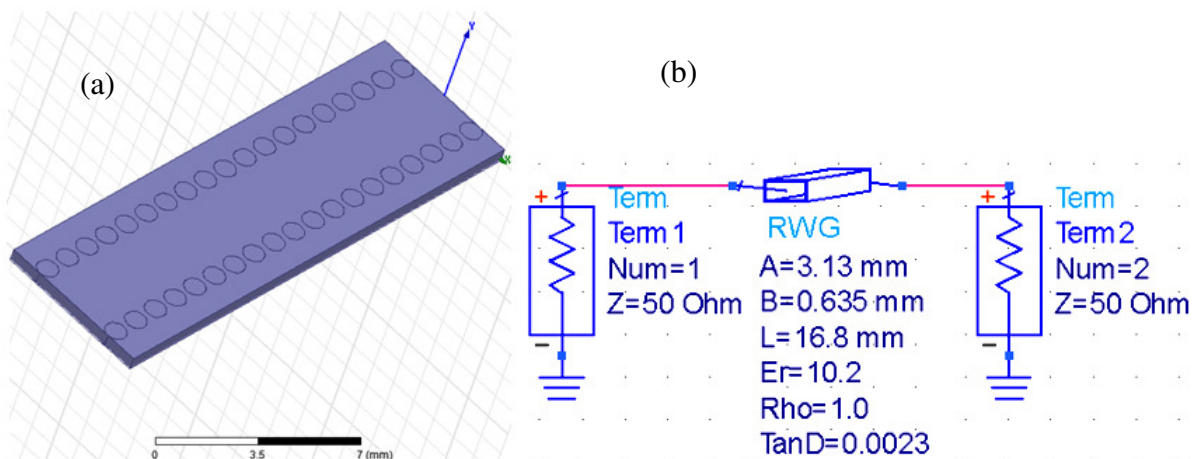


Figura 60 - Guia R6010 – SIWG ; (a) modelo 3D EM ; (b) modelo RWG ;

Para que a resposta de frequência seja larga em toda a banda, a transição microstrip foi dimensionada por meio da otimização de suas dimensões no simulador EM 3D de forma que a haja o casamento de impedância entre os conectores de 50Ω e a impedância de onda do guia que é aproximadamente 200Ω , desta forma espera-se que a perda de inserção $S_{21}(\text{dB})$ seja plana e próxima de 0dB de 15 a 60 GHz. A Figura 61 apresenta o modelo do protótipo com metalização em cobre para o Guia R6010 - SIWG com a transição microstrip cujas dimensões estão indicadas na Tabela 7.

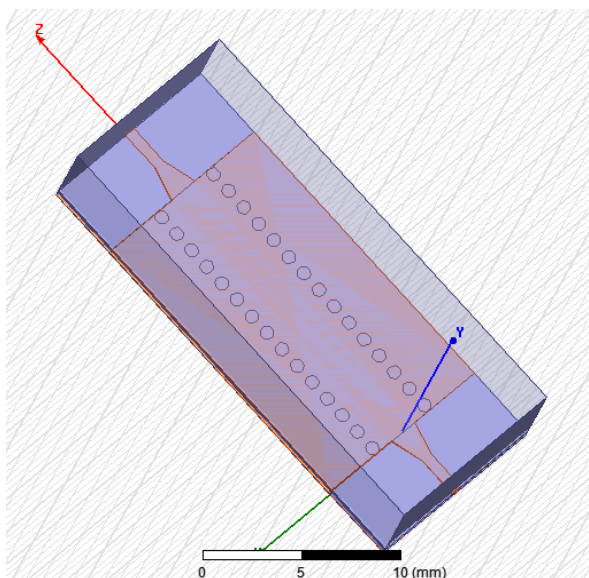


Figura 61 - Guia SIWG - R6010 de 15 GHz a 60 GHz com transições microstrip simulado no HFSS.

A resposta em frequência de banda larga em toda a faixa simulada para o protótipo do R6010-SIWG é apresentada na Figura 62, indicando uma perda de inserção de -1dB aproximadamente e um comportamento banda larga de 16 - 60 GHz com perda de retorno inferior a -10dB.

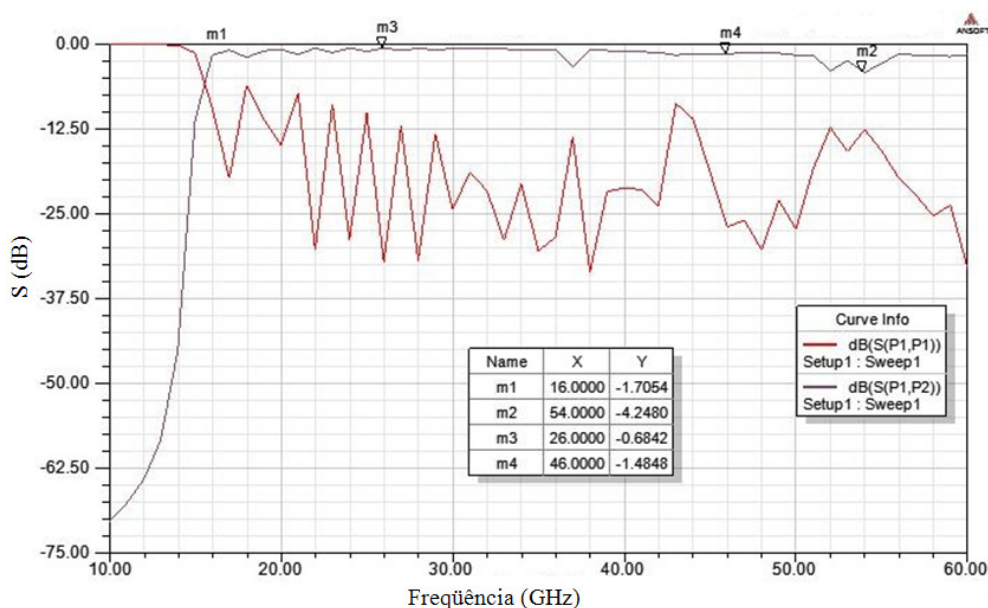


Figura 62 - Resposta em frequência da perda de inserção e da perda de retorno do guia SIWG – R6010 de 15 a 60 GHz / SIMULAÇÃO.

Dois protótipos, apresentados na Figura 63, são fabricados na prototipadora de circuitos impresso do CETUC e as vias são metalizadas de forma manual, o primeiro componente é realizado com as vias metalizadas com epox condutora. O segundo é metalizado com fio rígido de protoboard e também epox condutora. A Figura 64 apresenta a resposta em frequência para a etapa de medição da perda de inserção S_{21} (dB) no Analisador de Redes Vetorial até a frequência de 20 GHz. Nesta análise é possível observar que o protótipo 2 apresentou melhor resposta comparando com curva do modelo 3D do protótipo simulado. A perda de retorno S_{11} (dB) indicada na Figura 65 também indica que o protótipo 2 possui melhor desempenho na banda de medição.

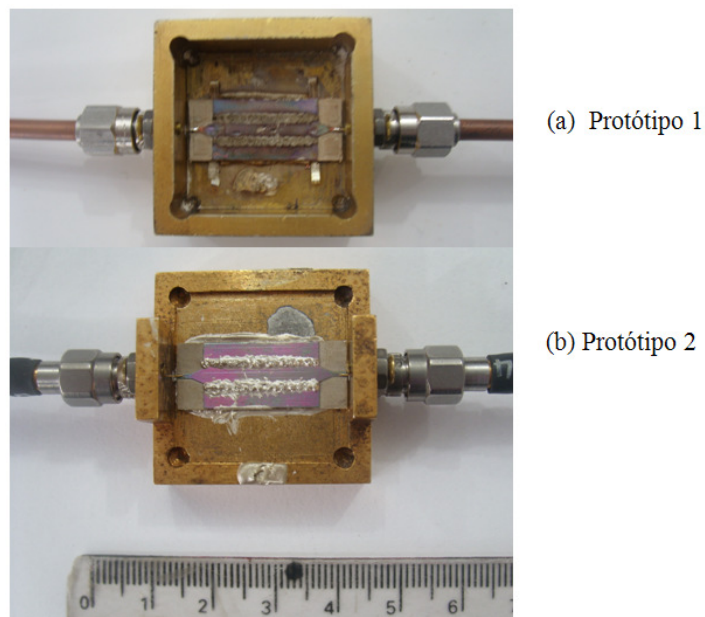


Figura 63 - Protótipos do guia SIWG - R6010 realizado na Prototipadora de circuitos impressos cuja metalização das vias foi manual. (a) vias metalizadas com epox; (b) vias metalizadas com epox + fio de protoboard.

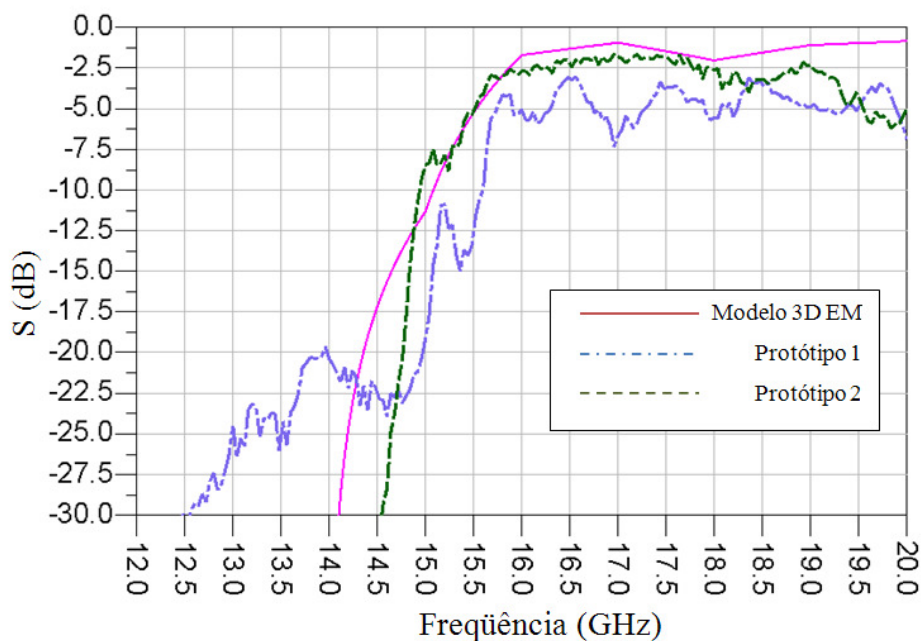


Figura 64 - Resposta em frequência da perda de inserção S_{21} do protótipo do guia R6010-SIWG (a) modelo 3D EM (b) protótipo com as vias metalizadas em epox ; (c) protótipo com as vias metalizadas com epox + fio de protoboard.

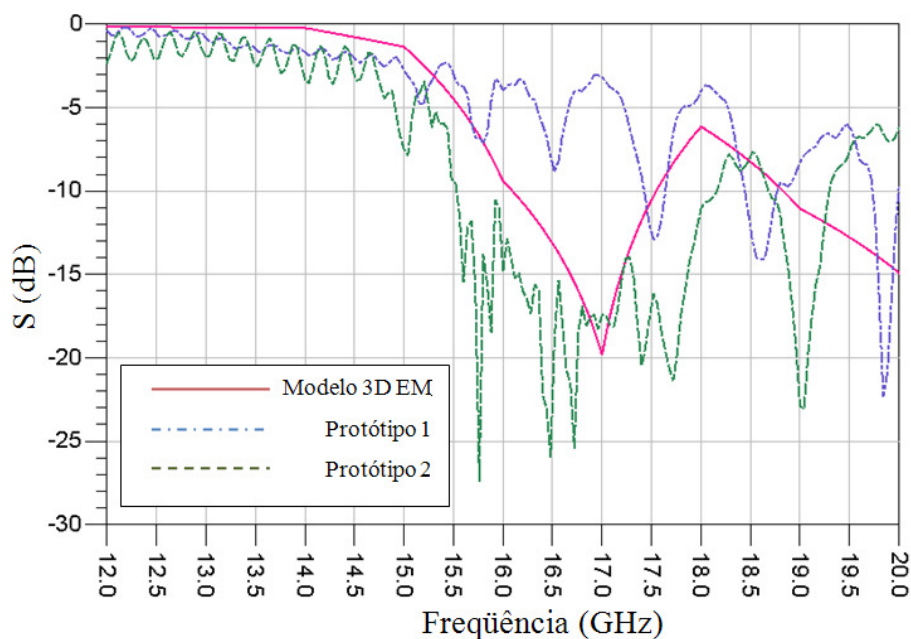


Figura 65 - Resposta em frequência da perda de retorno S_{11} do protótipo do guia R6010-SIW medido no analisador de redes vetorial ; modelo 3D EM ; (1) protótipo com as vias metalizadas em epox ; (2) protótipo com as vias metalizadas com epox + fio de protoboard.

De forma a caracterizar o comportamento linear de fase e o retardo de grupo dos 2 protótipos, ambos foram testados no analisador de redes vetorial na faixa de 15 GHz a 20 GHz e os resultados são apresentados nas figuras 66 e 67 respectivamente. Observa-se que os 2 protótipos possuem aproximadamente o mesmo valor para o retardo de grupo constante, 0.44 ns, e a fase com variação linear sendo possível a aplicação em sistemas de comunicações digitais.

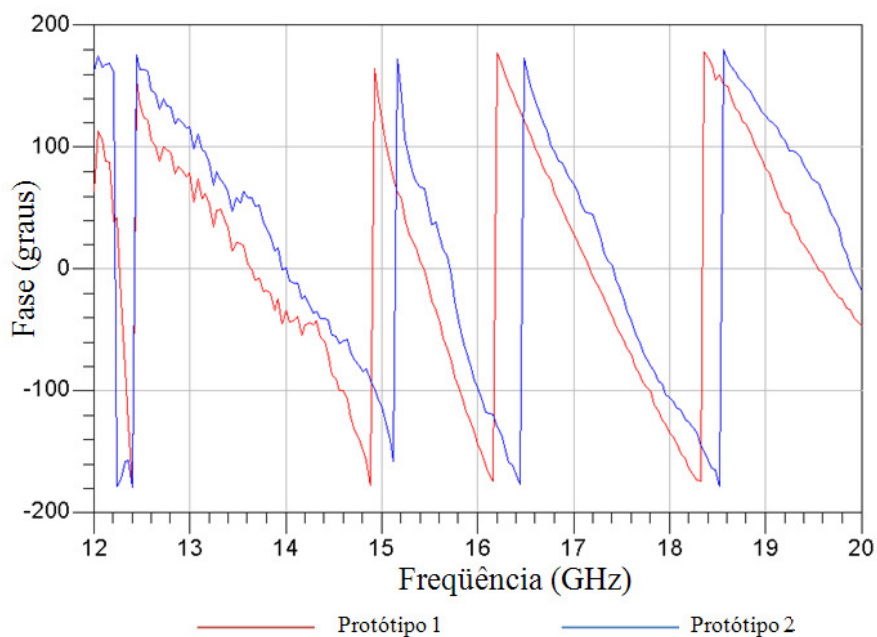


Figura 66 - Comportamento da fase do protótipo do guia R6010-SIWG medido no analisador de redes vetorial (1) protótipo com as vias metalizadas em epox ; (2) protótipo com as vias metalizadas com epox + fio de protoboard.

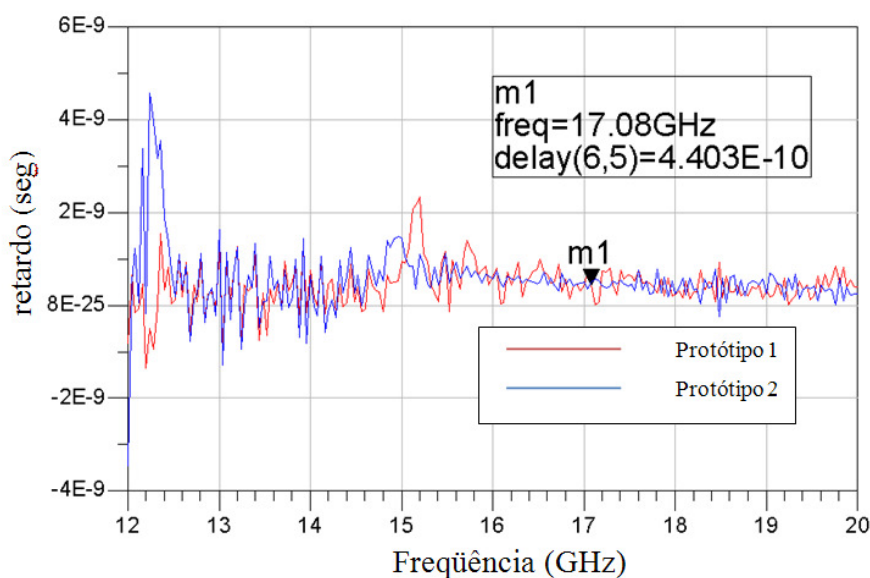


Figura 67 - Retardo de grupo do protótipo do guia R6010-SIWG medido no analisador de redes vetorial (1) protótipo com as vias metalizadas em epox ; (2) protótipo com as vias metalizadas com epox + fio de protoboard.

Na faixa de frequência de 20 a 40 GHz os protótipos foram testados utilizando um Gerador de varredura, um analisador de espectro, cabos e conectores de calibração selecionados para esta faixa. Este procedimento foi adotado devido as limitações de frequência superior dos analisadores vetorial e escalar disponíveis nos laboratórios do CETUC. A Figura 68 ilustra a bancada de testes para a avaliação da perda de inserção do guia na banda de 20 a 40 GHz. A perda de inserção S_{21} (dB) resultante dos componentes na faixa de frequência em questão confirma que o protótipo realizado com vias metalizadas de fio rígido mais epox condutora apresenta melhor comportamento até 40 GHz. O anexo 9 apresenta as curvas capturadas do analisador de Espectro para os dois casos em separado.

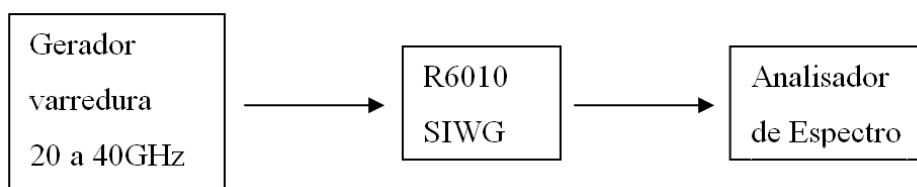


Figura 68 - Bancada de teste da perda de inserção de 20 a 40 GHz

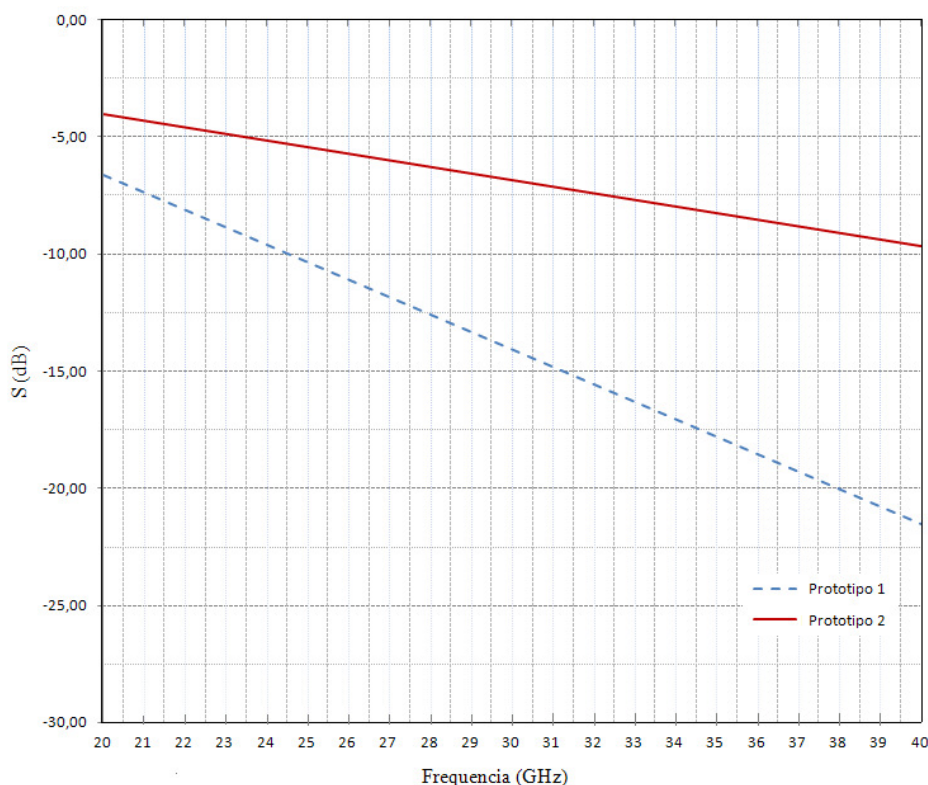


Figura 69 - Resposta em frequência para a perda de inserção de 20 a 40 GHz dos dois protótipos do guia R6010-SIWG realizados.

5.2 Protótipo SiGe-SIWG de 15 GHz a 60 GHz

De forma a possibilitar a realização de um guia de onda no bulk de silício na faixa de frequências indicadas, realizou-se um protótipo em SiGe. A Tabela 8 apresenta as dimensões calculadas para o protótipo realizado com um wafer de silício de espessura de 300 μm cujo respectivo modelo 3D de simulação Eletromagnética no domínio da frequência é apresentado na Figura 70.

SIWG - Si ($\epsilon_r=11.9$) (tg perdas=0.001)	
Protótipo de 15 a 60 GHz	
λ TE10 / freq TE10	5.7937 mm / 15 GHz
λ TE 20 / freq TE20	2.89 mm / 30 GHz
λ TE 01 / freq TE01	0.6 mm / 144.84 GHz
Altura / espessura do dielétrico definida pelo wafer disponível (H = b)	0.3 mm
a/b	9.63
distância (a) na direção x centro a centro das vias que formam a parede do guia	aRWG= 2.89 mm
	aSIWG = 2.89+(1.5*0.35)
	3.415 mm
distância (p) na direção Z centro a centro das vias que formam a parede do guia	1.15 mm
Diametro das vias que formam a parede do guia (d)	0.7 mm
d/p	0.608695652
d/a	0.242214533
raio das vias que formam a parede do guia (r)	0.35 mm
espaço (tangente) entre as vias da parede do guia	0.45 mm
quantidade de vias da parede na direção Z	15
Comprimento total do guia SIWG / qnte de vias em 1 linha paralela (1 parede)	16.8 mm
Retardo do guia calculado	0.19331 ns
comprimento do trecho de linha microstrip + transição	2* (4.1 mm)
l _{trm} = comprimento em Z do taper de melhor S ₂₁ = comprimento de onda na microstrip/4 em 15 GHz	1.82676 mm
base triang = comprimento em x que forma a base do taper (transição guia)	1.315 mm
Etapa de simulação no HFSS considerando agora a espessura de metalização superior e inferior a mesma da microstrip na frequência de corte TE10 . Estes resultados incluem os 2 trecho de linha microstrip	
w (largura) linha microstrip	0.3 mm
T (espessura) metalização microstrip SkinDepth	0.035 mm
SkinDepth 15 GHz dB/mm 15 GHz	6.92 E-4
SkinDepth 30 GHz dB/mm 30GHz	4.89 E-4
Atenuação em db dos trecho de linha microstrip considerando 4.1 mm de linha em 15 GHZ	0,01512 dB/mm em 15 GHz 0,02304 dB/mm em 30 GHz

	0,03512 dB/mm em 60 GHz
SkinDepth dos 2 trechos microstrip	6.92 E-4 mm / 15 GHz
	4.89E-4 mm / 30 GHz
	3.460E-4 mm / 30 GHz

Tabela 8 - Dimensões do protótipo do guia SiGe –SIWG

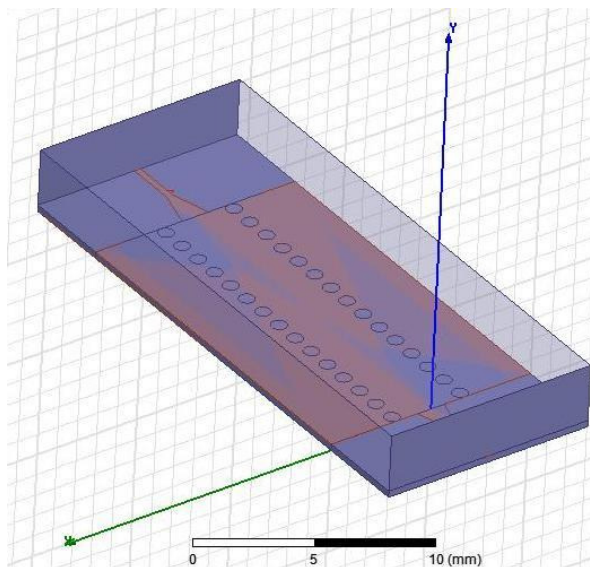


Figura 70 - Modelo 3D EM do guia SiGe-SIWG

A Figura 71 mostra o resultado da perda de inserção S_{21} (dB) e perda de retorno S_{11} (dB) simulada de forma a obter a máxima transferência de potência e uma banda larga na faixa de 50 GHz a 60 GHz.

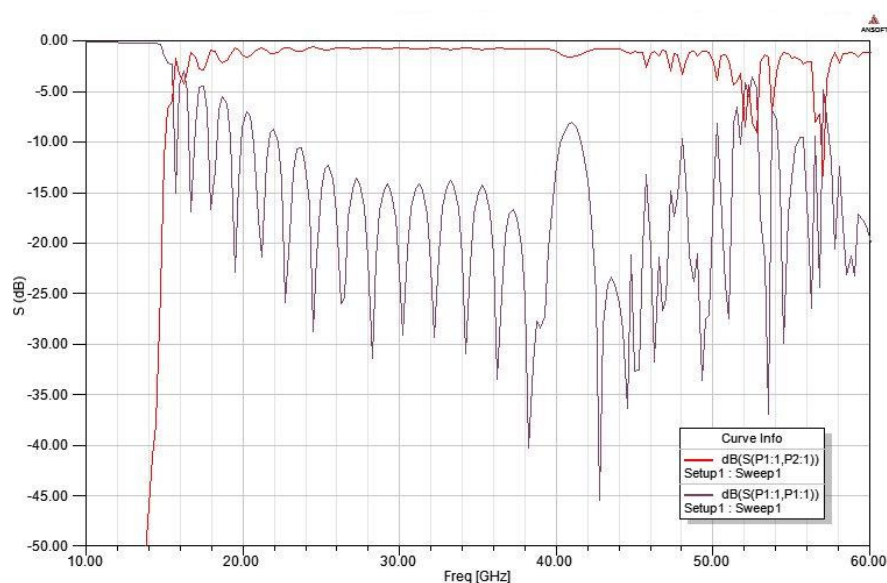


Figura 71 - Resposta em frequência do modelo do guia SiGe-SIWG realizado com transição microstrip.

A Figura 72 apresenta a resposta linear da fase do protótipo, indicando a boa utilização deste guia num sistema de modulação digital. A Figura 73 apresenta o retardo de grupo do guia de 0.3 ns (nano segundos) linear na região central da banda do guia.

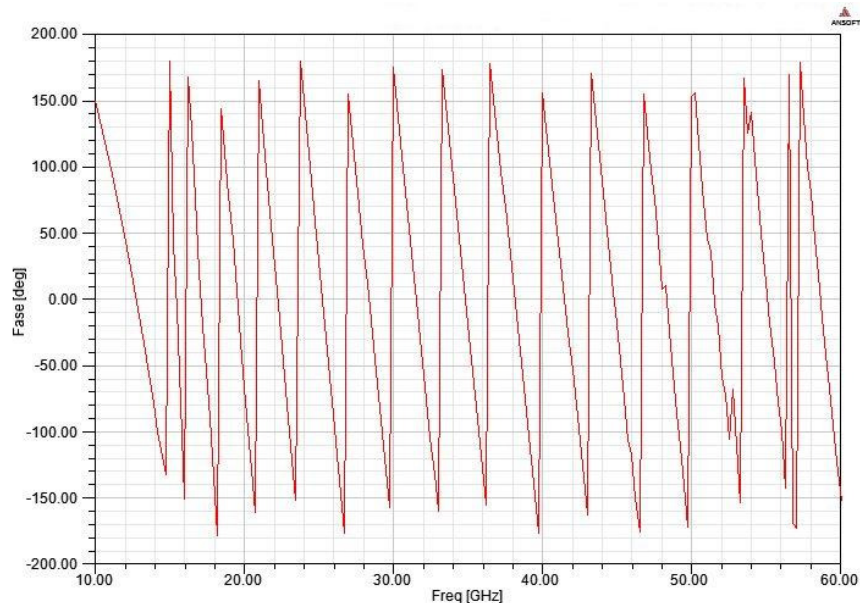


Figura 72 - Resposta em frequência da fase do guia SiGe-SIWG realizado com transição microstrip.

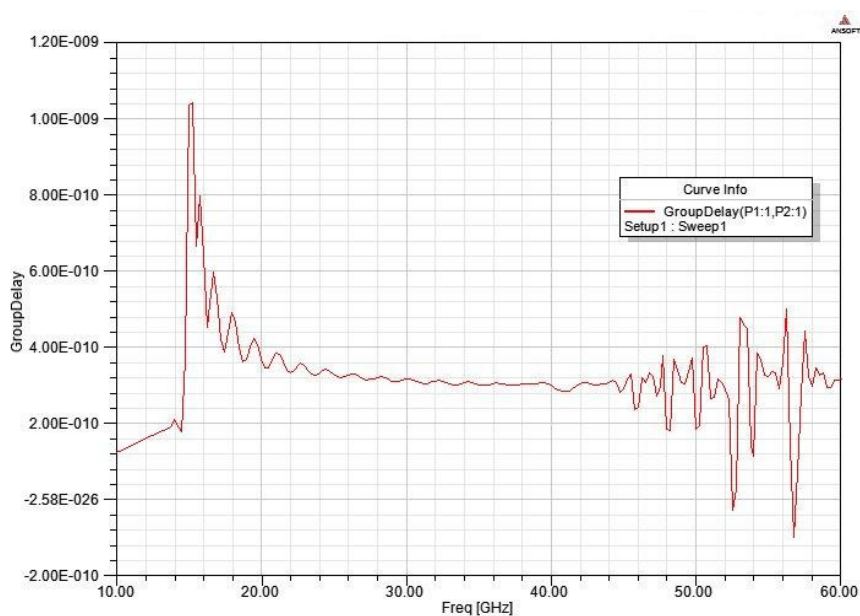


Figura 73 - Retardo de grupo do guia SiGe-SIWG realizado com transição microstrip.

O protótipo é realizado em uma máquina de corte a laser [40] de forma a possibilitar que os furos sejam realizados por um laser pulsado cujo feixe é que determina o diâmetro exato dos furos. A Figura 74 apresenta o protótipo realizado que é aproximadamente do tamanho de uma moeda de 50 centavos.

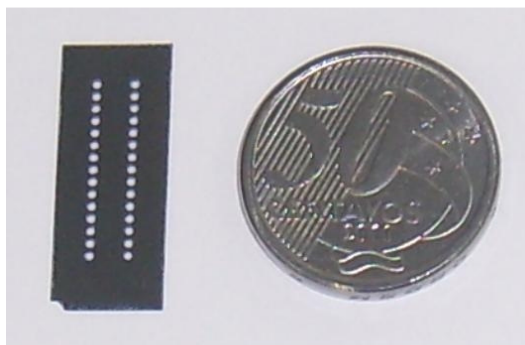


Figura 74 - Protótipo do guia SiGe-SIWG realizado sem a metalização.

A Figura 75 apresenta o protótipo do guia metalizado no laboratório de semicondutores da PUC-Rio, com uma camada de metalização de 0.2 μm de ouro e conectores que operam até pelo menos 40 GHz [41]. A montagem sobre substratos de SiGe com metalização inferior

a 1 μm penaliza severamente sua continuidade, isto é, provoca rupturas nas linhas / 50Ω que acessam a transição microstrip que ativa o SIWG. Desta forma a metalização em camadas muito finas pode prejudicar o desempenho do protótipo sendo necessária a avaliação de diferentes espessuras de metalização superiores a 1 μm permitindo que os furos sejam também metalizados. A Figura 76 ilustra através de simulação o aumento da atenuação do dispositivo estudado em função da espessura de metalização, desta forma observa-se que as espessuras de metalizações mais indicadas para este componente é são de aproximadamente 1 μm ou acima até 35 μm , pois a perda de inserção está em torno de 0,8 dB.

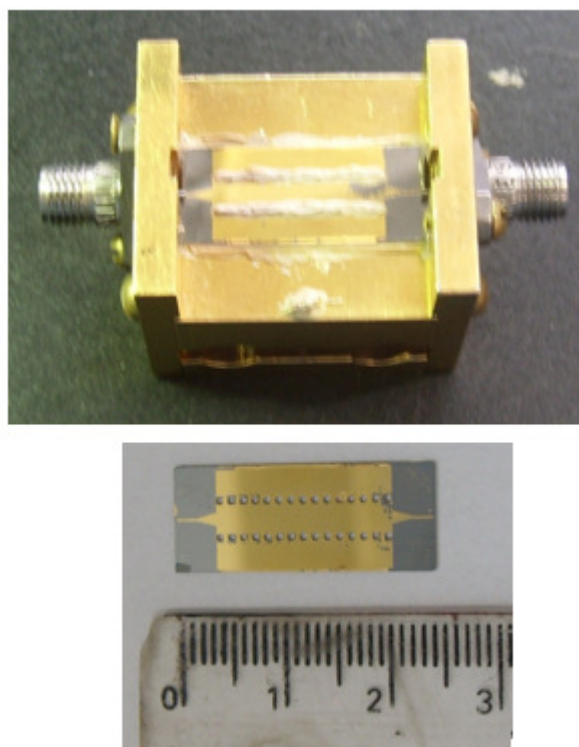


Figura 75 - Protótipo do guia SiGe-SIWG realizado com a transição microstrip e metalização de 0.5 μm de ouro; (a) protótipo conectorizado sendo as vias metalizadas com epox ; (b) protótipo sem conectorização e sem metalização das vias.

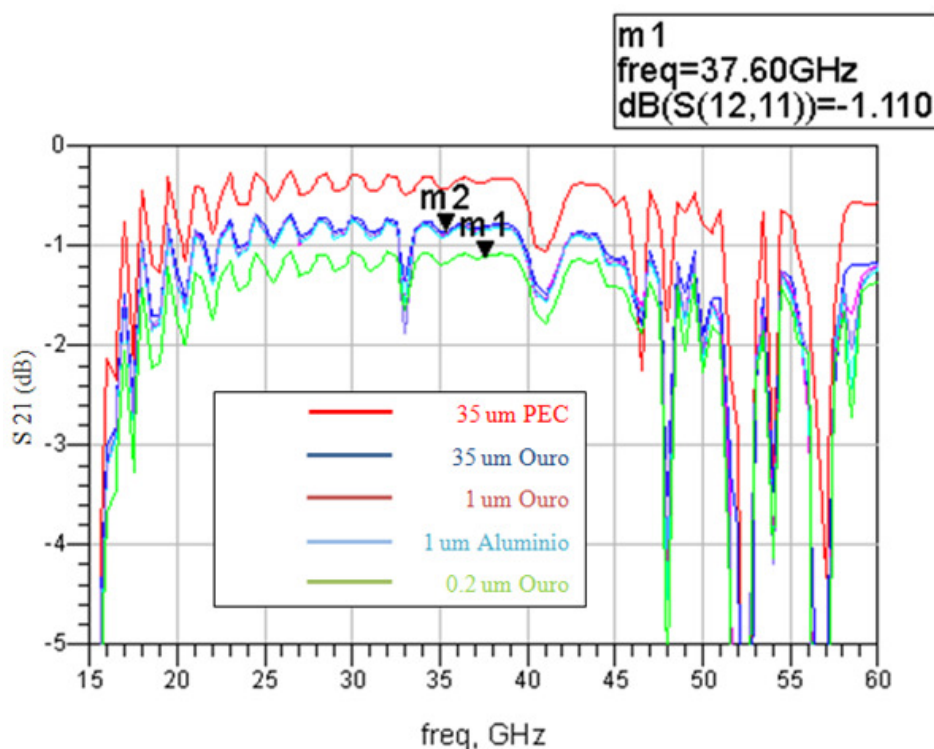


Figura 76 - Simulação da Perda de inserção do protótipo em SiGe na faixa de frequências de (15-60) GHz para diversas espessuras de metalização.

5.3 Comentários

Ao longo do presente capítulo é apresentado o projeto, a simulação, a realização e a caracterização de um guia de onda SIW. Embora projetado para a faixa de frequência de (10-60) GHz, sua caracterização limitou-se a frequência máxima de 40 GHz devido aos equipamentos de nossos laboratórios. O substrato escolhido, R6010, possui constante dielétrica $E_R=10$, valor próximo dos valores apresentados pelo GaAS e SiGe. A espessura de metalização da amostra utilizada é de $35\mu\text{m}$. Como principal resultado podem ser destacados a verificação do fenômeno de guiamento nos dois modelos realizados sobre o R6010, a frequência de corte medida idêntica a obtida no projeto e simulação do protótipo 2 apesar do substrato utilizado não ser usualmente aplicado nestas faixas de frequências. Outros protótipos foram realizado no substrato de SiGe mas as espessuras de metalização envolvidas, de aproximadamente $0,2\mu\text{m}$ apresentaram dificuldades quando da sua montagem e conectorização.

A configuração de furos metalizados realizados através de cola condutora EPOXY H20E e fios metálicos apresentou bom desempenho no protótipo realizado sobre o material dielétrico (R6010). A atenuação medida esta associada ao comprimento total do dispositivo ser de 25,4 mm, significativamente superior a aplicações nestas taxas. O mesmo procedimento de montagem quando aplicado no substrato de SiGe danificou sua configuração e sua metalização.

Deve ser ressaltado que estes dispositivos devem ser realizados por técnicas de crescimento epitaxial, formação de furos metalizados e metalização de camadas de pelo menos 1,5 μm .