



**Vanessa Przybylski Ribeiro Magri**

**Integração de Circuitos de Altas Velocidades por meio de  
Guia de Onda Semicondutores e Substratos FR-4**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marbey Manhães Mosso

Rio de Janeiro  
Agosto de 2011



**Vanessa Przybylski Ribeiro Magri**

## **Integração de Circuitos de Altas Velocidades por meio de Guia de Onda Semicondutores e Substratos FR -4**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marbey Manhães Mosso**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

**Prof. Gláucio Lima Siqueira**

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

**Profa. Maria Cristina Ribeiro Carvalho**

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

**Prof. Rodolfo Araújo de Azevedo Lima**

Instituto de Pesquisas da Marinha

**Prof. Antonio Dias de Macedo Filho**

Universidade Gama Filho

**Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia**

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

**Prof. Luiz Alberto de Andrade**

Instituto de Aeronáutica e Espaço/CTA

**Profa. Claudia Barucke Marcondes Paes Leme**

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de agosto de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Vanessa Przybylski Ribeiro Magri**

Engenheira Eletricista com ênfase em Telecomunicações, graduada em 2004 na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Mestrado concluído em 2007 no CETUC (Centro de Estudos em Telecomunicações PUC-Rio). Doutorado concluído no CETUC em 26 de Agosto de 2011 no laboratório de Sistemas Ópticos e Engenharia de Microondas e Microcircuitos. A atual linha de pesquisa é em Eletromagnetismo avançado, dispositivos de microondas, sistemas de comunicações ópticas e circuitos eletrônicos logicamente programáveis (FPGA).

#### Ficha Catalográfica

Magri, Vanessa Przybylski Ribeiro

Integração de circuitos de altas velocidades por meio de guia de onda semicondutores e substratos FR-4 / Vanessa Przybylski Ribeiro Magri ; orientador: Marbey Manhães Mosso. – 2011.

132 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2011.

Inclui bibliografia

CDD: 621.3

Dedico o sucesso desta etapa da minha vida a quem sempre me incentivou a enfrentar desafios, ensinou e esteve presente, nos momentos certos e incertos : a DEUS pela graça da vida, principalmente aos meus pais e a minha irmã pela amizade eterna, a toda minha família pelo amor e compreensão, as amigas verdadeiras que me incentivaram também nos momentos em que fui ausente e a alguém que chegou nesta etapa da minha vida com compreensão, respeito, amizade e carinho, meu namorado.

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador Professor Marbey Manhães Mosso pelos ensinamentos, incentivo e dedicação nesta pesquisa e para minha carreira.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Ao pesquisador do GSOM/CETUC Rodolfo Lima pela dedicação e ensino durante todos os anos que estudei e trabalhei na PUC-Rio.

Aos pesquisadores e amigos do GSOM/CETUC, Claumir Sarzeda, Henrique Portella, Fernando Diniz, Marcela Silva Novo, Juliana Barros Carvalho, Jorge Angelo Mitrione Souza e Gelza de Moura Barbosa. E também aos amigos do laboratório do PAA/CETUC pelo apoio e amizade.

Ao Pesquisador Juliano Fujioka Mologni , ESSS (software HFSS) .

A Mauricio Kobayashi, Agilent Technologies Brasil (software ADS).

Ao laboratório de Optoeletrônica/CETUC pelo apoio as técnicas de fabricação no CETUC.

A equipe técnica da empresa Lasertools ([www.lasertools.com.br/](http://www.lasertools.com.br/)) de São Paulo.

Ao Pesquisador Rudy Massami Sakamoto Kawabata do Laboratório de Semicondutores do CETUC/PUC-Rio ([www.labsem.cetuc.puc-rio.br](http://www.labsem.cetuc.puc-rio.br)) .

Ao Rogério da Silva Pereira suporte Técnico / Engenharia CETUC .

E aos funcionários do CETUC Marcio José Hote Alves, Marcelo Napoleão Alves e “Chiquinho”.

## Resumo

Magri, Vanessa P. Ribeiro; Mosso, Marbey Manhães. **Integração de Circuitos de Altas Velocidades por meio de Guia de Onda Semicondutores e Substratos FR-4**. Rio de Janeiro, 2011, 132p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Estudos em Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho de Tese apresenta a pesquisa e desenvolvimento de conexões de ondas guiadas sobre substratos semicondutores (SiGe, GaAs). A integração de circuitos digitais através de guias S-SIWG (Semiconductor Substrate Integrated Waveguide) utilizando formato de modulação QAM é avaliada e destacada. Conexões internas aos chips e entre chips são associadas com o novo padrão Gigabit Ethernet 802.3ba operando na taxa de 100 Gbit/s estendendo-se a aplicações de 0,5 – 1,5 Terahertz. É também apresentada a pesquisa e o desenvolvimento de guias e dispositivos de microondas utilizando substratos de baixo custo e altas perdas (FR-4), substratos cerâmicos de alta constante dielétrica ( $\epsilon_r=80$ ) e aplicações em subsistemas híbridos integrados.

## Palavras-chave

Guias de onda planares; Circuitos Integrados; 100 Giga Bit Ethernet; Substratos Semicondutores SiGe, GaAs; FR-4 ; Substratos Cerâmicos

## Abstract

Magri, Vanessa P. Ribeiro; Mosso, Marbey Manhães (Advisor). **High Speed Semiconductor and FR-4 Integrated Waveguide**. Rio de Janeiro, 2011, 132 p , Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Estudos em Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents the research, design and development of guided waves connections in semiconductor substrates (SiGe, GaAs). The integration of digital systems using Semiconductor Wave Guides (S-SIWG) with QAM modulation formats are highlighted. Ultra-fast inter-chip and inner-chip connections are associated with the new Gigabit Ethernet IEEE 802.3ba standard at 100Gbit/s extended to (0.5-1.5) Terahertz domain. Additionally fiber glass substrates with high losses (Teflon/FR-4) and high dielectric ceramic substrates ( $\epsilon_r = 80$ ) are also developed to be integrated with microwave devices, analog printed circuits boards and high Speed digital circuits and systems.

## Keywords

Semiconductor Substrate Integrated Wave Guide, SiGe, GaAs; FR-4 substrate; IEEE 802ba ; High Speed Printed Circuit Board; Integrated Circuits; Electronic Circuits.

## Sumário

1. Introdução	17
2. Guias de onda em substratos dielétricos	20
2.1. Guias NRD	20
2.2. Modelo guias RWG x SIWG	24
2.3. Estruturas de transição entre linhas planares e guias SIWG	27
2.3.1. Transição Microstrip - SIWG	27
2.3.2. Transição Coaxial – SIWG	28
2.4. Comentários	30
3. Subsistemas de Ondas Guiadas	31
3.1. FR-4 SIWG	31
3.2. FR-4 PCB em 10Gb/s	37
3.3. Filtro SIWG no FR-4 centrado em 10 GHz	41
3.4. Ondas guiadas em substratos de Altíssimas constantes dielétricas	46
3.5. Comentários	50
4. Utilização de guias semicondutores em circuitos integrados no domínio do Gigabyte e Terabyte.	52
4.1. Interfaces eletrônicas Ultra Rápidas	52
4.2. Conexões utilizando configurações S-SIWG	57
4.2.1. Implementação em Substrato de Arseneto de Gálio (GaAs).	57
4.2.2. Implementação em Substrato de Silício Germânio (SiGe)	60
4.2.3. Avaliação do SiGe - SIWG na faixa de frequência de (40-160) GHz	62
4.2.4. Avaliação das Perdas em configurações SIWG e linhas microstrip	64
4.3. Excitação de conexões SIWG por meio de adaptadores Coaxial – SIWG	67
4.4. Conexões de sinais digitais utilizando módulos SIWG na taxa de 100 Gbit/s em substratos semicondutores	72
4.5. Comentários	74

5. Protótipo de guia de onda operando na faixa de frequências de (15 – 60) GHz	76
5.1. R6010 –SIWG	76
5.2. Protótipo SiGe-SIWG de 15 GHz a 60 GHz	84
5.3. Comentários	89
6. Comentários finais e conclusões	91
6.1. Observações Finais	91
6.2. Principais Resultados Obtidos	92
6.3. Trabalhos Futuros	93
7. Referências Bibliográficas	94
Anexo 1 - Condições de Contorno guia NRD	97
Equações de propagação no meio dielétrico homogêneo sem fontes e sem cargas	97
Condições de Contorno em um guia dielétrico formado por 2 meios dielétricos sem fontes e sem cargas de paredes metálicas	98
A) Modos de propagação LSE <sub>x</sub> (Longitudinal Section Electric) ou TEx (Transversal Electric) em relação a x :	100
B) Modos de propagação LSM <sub>x</sub> (Longitudinal Section Magnetic) ou TM <sub>x</sub> (Transversal Magnetic) em relação a x :	102
Anexo 2 - Teorema de Floquet	105
Anexo 3 - Diferentes configurações das vias do guia NRD	106
Anexo 4 - Dimensões do guia NRD	107
Anexo 5 - Publicação 1	110
Anexo 6 - Publicação 2	116

Anexo 7 - Publicação 3	121
Anexo 8 : GB Ethernet	125
Ethernet 1 Gb/s	126
Ethernet 10 Gb/s	127
Ethernet 100 Gb/s e 400 Gb/s	129
Anexo 9 - Resultado de medidas Protótipo SIWG R6010	131

## Lista de Figuras

Figura 1 - Condições de Contorno de um guia dielétrico retangular ideal.	21
Figura 2 - Configuração tridimensional do guia NRD ;	
(a) Modelo de guia dielétrico retangular ideal ;	
(b) Modelo real do guia NRD.	21
Figura 3 - Aproximação pelo Teorema de Floquet para a propagação no guia NRD.	22
Figura 4 – Modelo tridimensional do guia NRD em Alumina simulado no CST.	23
Figura 5 - Simulação Eletromagnética para o guia NRD em Alumina.	24
Figura 6 – Modelo tridimensional dos guias de onda: (a) SIWG 3D ;	
(b) modelo RWG.	25
Figura 7 - Transição microstrip para SIWG [6].	28
Figura 8 - Modelo tridimensional de um guia SIWG excitado por probe coaxial.	28
Figura 9 - Corte longitudinal do guia SIWG no centro do coaxial.	29
Figura 10 - Modelo do guia em FR4 ; (a) Modelo eletromagnético 3D ;	
(b) Modelo RWG.	32
Figura 11 - Resultados da simulação eletromagnética (a) SIWG 3D;	
(b) Modelo equivalente RWG	33
Figura 12 - Modelo 3D do guia FR-4 SIWG com transição microstrip;	
(a) parede com uma fileira de furos; (b) parede com duas fileiras de furos no HFSS [19];	34
Figura 13 - Resultado de simulação eletromagnética do modelo 3D do FR-4 SIWG com transição microstrip comparação da parede do guia.	34
Figura 14 - Protótipo SIWG com transição microstrip.	35
Figura 15 - resultado simulação SWG comparado com resultado experimental.	35
Figura 16 - Comportamento de Fase do FR4 - SIWG , comparação de simulação EM e medição experimental.	36
Figura 17 –Retardo de grupo do protótipo FR4-SIWG, resultado medido.	36
Figura 18 - Setup experimental para teste da transmissão digital PRBS 2.5Gbits/s no guia FR-4 SIWG na portadora de 10 GHz	37
Figura 19 - Espectro digital medido antes e depois do guia FR-4 SIWG	

na configuração da figura 18.	38
Figura 20 - Diagrama de olho para a transmissão do sinal PRBS de 2.5 Gbits/s no guia FR-4 SIWG na configuração da figura 18.	39
Figura 21 - Transmissão digital serial de 10Gbit/s no FR-4 SIWG com modulação QAM	39
Figura 22 - Circuito de simulação da transmissão do sinal PRBS 10Gbit/s no formato 16-QAM integrado com o modelo 3D EM do guia FR-4 SIWG	40
Figura 23 - Espectro simulado para a transmissão do sinal digital PRBS 10Gbit/s no formato 16-QAM : em azul o sinal na entrada do guia e em verde o sinal na saída do guia.	41
Figura 24 - Diagrama de olho para a transmissão do sinal PRBS 10 Gbits/s modulado em 16-QAM transmitido no guia FR-4 SIWG.	41
Figura 25 - Filtro SIWG 3D no FR-4	42
Figura 26 - Modelo equivalente do circuito PI de cada via metalizada centralizada no guia [22].	42
Figura 27 - Circuito equivalente do filtro SIWG utilizado para simulação e otimização no ADS	43
Figura 28 - Comparação entre a simulação EM 3D do filtro SIWG e a simulação do circuito equivalente.	44
Figura 29 - Protótipo do filtro com transição Microstrip e conectorização, equivalente modelo 3D no CST.	45
Figura 30 - Comparação entre a simulação do modelo 3D do filtro e a caracterização experimental do protótipo.	45
Figura 31 - Resultado experimental da fase e do retardo do filtro SIWG.	46
Figura 32 - Modelo SIWG $\epsilon_r=80$ : (a) modelo tridimensional; (b) modelo RWG equivalente.	47
Figura 33 - Resultado de simulação eletromagnética SIWG x RWG no substrato Trans-tech S-8600 para $a_{RWG}=a_{SIWG} = 3.3518$ mm	48
Figura 34 - Resultado de simulação eletromagnética SIWG x RWG no substrato Trans-tech S-8600 para $a_{RWG}=3.3518$ mm e $a_{SIWG} = 3.7418$ mm .	48
Figura 35 - Radar de acompanhamento em um circuito	

totalmente integrado pela tecnologia SIWG	50
Figura 36 - Detalhes da arquitetura 100GBE IEEE802.3ba	
indicado uma redução de	53
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.	54
Figura 38 - Novo perfil das camadas MAC e PHY utilizando conexões seriais SIWG associados ao padrão 802.3ba.	55
Figura 39 – Nova Tecnologia de conexão Inter-chip por meio de guias de ondas S-SIWG.	56
Figura 40 - GaAs-SIWG ; (a) Modelo 3D; (b) modelo RWG equivalente.	58
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.	59
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.	60
Figura 43 - SiGe-SIWG (a) Modelo 3D EM ; (b) modelo RWG equivalente	61
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.	62
Figura 45 - Modos excitados no guia SiGe-SIWG sem transição na banda de 50 GHz a 160 GHz.	63
Figura 46 - Distribuição do campo eletromagnético nas portas do guia SiGe-SIWG; (a) TE <sub>10</sub> ; (b) TE <sub>20</sub> ; (c) TE <sub>01</sub>	63
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	65
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.	66
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.	66
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.	68
Figura 51 - Modelo 3D EM do guia SiGe-SIWG com a transição coaxial de 50 Ω	69
Figura 52 - Modos excitados no guia SiGe-SIWG com transição coaxial de 50 Ω na banda de 50 GHz a 150 GHz.	69
Figura 53 - Distribuição do campo eletromagnético nos probes coaxial de 50Ω do guia SiGe-SIWG.	70
Figura 54 - Resposta em frequência para a perda de inserção e perda de retorno do guia SiGe-SIWG com transição coaxial de 50Ω	71
Figura 55 - Comportamento de Fase do SiGe - SIWG com transição coaxial de 50Ω	71
Figura 56 - Comportamento de retardo de grupo do SiGe -SIWG com transição coaxial de 50 Ω	72
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”.	73
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.	74
Figura 59 - Diagrama de olho para a transmissão do sinal PRBS 25 Gbits/s transmitido no guia SiGe-SIWG.	74
Figura 60 - Guia R6010 – SIWG ; (a) modelo 3D EM ; (b) modelo RWG ;	78
Figura 61 - Guia SIWG - R6010 de 15 GHz a 60 GHz com transições microstrip simulado no HFSS.	78
Figura 62 - Resposta em frequência da perda de inserção e da perda de retorno do guia SIWG – R6010 de 15 a 60 GHz / SIMULAÇÃO.	79
Figura 63 - Protótipos do guia SIWG - R6010 realizado na Prototipadora de circuitos impressos cuja metalização das vias foi manual. (a) vias metalizadas com epoxy; (b) vias metalizadas com epoxy + fio de protoboard.	80
Figura 64 - Resposta em frequência da perda de inserção S21 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.	80

Figura 65 - Resposta em frequência da perda de retorno S11 do protótipo do guia R6010-SIWG 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.	81
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.	82
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.	82
Figura 68 - Bancada de teste da perda de inserção de 20 a 40 GHz	83
Figura 69 - Resposta em frequência para a perda de inserção de 20 a 40 GHz dos dois protótipos do guia R6010-SIWG realizados.	83
Figura 70 - Modelo 3D EM do guia SiGe-SIWG	85
Figura 71 - Resposta em frequência do modelo do guia SiGe-SIWG realizado com transição microstrip.	86
Figura 72 - Resposta em frequência da fase do guia SiGe-SIWG realizado com transição microstrip.	86
Figura 73 - Retardo de grupo do guia SiGe-SIWG realizado com transição microstrip.	87
Figura 74 - Protótipo do guia SiGe-SIWG realizado sem a metalização.	87
Figura 75 - Protótipo do guia SiGe-SIWG realizado com a transição microstrip e metalização de 0.5um de ouro; (a) protótipo conectorizado sendo as vias metalizadas com epox ; (b) protótipo sem conectorização e sem metalização das vias.	88
Figura 76 - Simulação da Perda de inserção do protótipo em SiGe na faixa de frequências de (15-60) GHz para diversas espessuras de metalização.	89

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dimensões do guia FR4-SIWG.	32
Tabela 2 - Dimensões do guia de alta constante dielétrica $\epsilon_r=80$ no Substrato Transtech S-8600 [3]	47
Tabela 3 - Taxas de transmissão nos formatos de modulação digital QAM.	56
Tabela 4 - Dimensões do GaAs-SIWG para aplicações de 50 GHz a 150 GHz e também 300 GHz a 1.5 THz	59
Tabela 5 - Dimensões do SiGe-SIWG nas bandas de 50 - 150 GHz e de 0.5 - 1.5 THz	61
Tabela 6 - Dimensões do guia SiGe - SIWG com a transição coaxial /SIWG.	68
Tabela 7 - Dimensões do protótipo do guia no substrato Roger 6010.	77
Tabela 8 - Dimensões do protótipo do guia SiGe –SIWG	85