

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**MICHEL BERNARDO FERNANDES DA SILVA**

**Modelagem de Chaves MEMS  
para Aplicações em RF**

São Paulo

2007

**MICHEL BERNARDO FERNANDES DA SILVA**

**Modelagem de Chaves MEMS  
para Aplicações em RF**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte das exigências para obtenção do grau de Mestre em Engenharia

Área de Concentração : Sistemas Eletrônicos  
Orientador: Prof. Dr. Silvio Ernesto Barbin

São Paulo

2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 04 de novembro de 2007

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

**Silva, Michel Bernardo Fernandes da**  
**Modelagem de chaves MEMS para aplicação em RF / M.B.F.**  
**da Silva. - São Paulo, 2007. Edição Revisada**  
**86 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade**  
**de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunica-**  
**ções e Controle.**

**1.Engenharia elétrica 2.Engenharia eletrônica 3.Tecnologia**  
**de microondas 4.Circuitos de microondas 5.Sistemas microele-**  
**tromecânicos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.**  
**Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle**  
**II.t.**

## DEDICATÓRIA

Primeiramente a Deus, pela vida, saúde, força, vontade que nunca tem me faltado.

À Ana Luiza, minha namorada, pela compreensão, apoio e auxílio nos momentos  
mais difíceis.

À minha família, pelas oportunidades que me proporcionaram

À Maria Madalena, a Quinha, da qual tenho muitas saudades

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Silvio Ernesto Barbin pela sua dedicação, comprometimento, apoio e ensinamentos, que sem os quais não estaria concluído o Mestrado.

À Escola Politécnica pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

## RESUMO

Nesta dissertação, os principais conceitos de MEMS, suas aplicações, processos de fabricação, componentes e sistemas são abordados. O objetivo desta dissertação é o estudo detalhado de chaves MEMS para aplicações em RF, que apresentam bom comportamento em altas frequências e com potencial de melhoria em sua banda de operação.

Em particular, aprofundou-se o estudo para o caso de uma chave MEMS de membrana capacitiva paralela sobre um guia de onda coplanar ou CPW – *Coplanar Waveguide*. O objetivo foi o de ampliar sua banda de operação, mantendo-se outras especificações inalteradas.

Partindo-se de uma chave com banda de operação nula para critérios de perda de retorno e isolamento mínimas iguais a 20 dB, com alteração na geometria da chave foi possível obter-se uma banda de 28 GHz e posteriormente ampliá-la para 31 GHz, praticamente sem alteração nas demais características elétricas.

**Palavras-chaves:** Sistemas Microeletromecânicos. Chaves MEMS de RF. Aumento de banda.

## ABSTRACT

In this thesis, the main concepts of MEMS, their application, fabrication processes, components and systems are addressed. The objective of the thesis is a detailed study of MEMS switches for RF applications, that present good performance at high frequencies and with a potential for bandwidth improvement.

More specifically, the study was deeply conducted for shunt capacitive membrane MEMS switches over CPW - Coplanar Waveguide. In this case, the objective was to enlarge the operation bandwidth, keeping the other specifications unchanged.

Starting with a switch with null operational bandwidth for criteria of minimum return loss and isolation of 20 dB, after a modification in the switch geometry, it was possible to obtain an operational bandwidth of 28 GHz and then to enlarge it to 31 GHz, keeping almost unchanged the other electric characteristics.

**Keywords:** MicroElectromechanical Systems. RF MEMS switches. Bandwidth enhancement.

## SUMÁRIO

	Lista de abreviaturas .....	x
	Lista de figuras .....	xii
	Lista de tabelas.....	xiv
<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
	1.1 Considerações iniciais sobre MEMS .....	1
	1.2 Aplicações de MEMS e Mercado .....	4
	1.3 Fabricantes de MEMS .....	7
	1.4 Pesquisas em MEMS .....	10
	1.5 Organização da dissertação .....	12
<b>2</b>	<b>MEMS .....</b>	<b>14</b>
	2.1 Classificação de Sistema Eletromecânicos .....	14
	2.2 Histórico de MEMS .....	15
	2.3 Materiais para confecção de MEMS .....	18
	2.3.1 Escolha do Substrato .....	18
	2.3.2 Escolha do Filme Fino .....	19
	2.4 Processos de fabricação de MEMS .....	20
	2.4.1 Processo de fabricação de chave da literatura inicialmente empregada neste trabalho .....	24
<b>3</b>	<b>MEMS para aplicações em RF .....</b>	<b>26</b>
	3.1 Requisitos de Sistemas de RF .....	26
	3.2 Principais componentes MEMS para aplicações RF .....	27
	3.3 Principais circuitos MEMS para aplicações RF .....	29
	3.4 Oportunidades de uso de componentes MEMS de RF .....	31



<b>4</b>	<b>Chaves MEMS de RF .....</b>	<b>33</b>
	4.1 Requisitos de chaves para RF .....	33
	4.2 Comparativo com outras tecnologias de chaves .....	36
	4.3 Aplicações de chaves MEMS .....	39
	4.4 Tipos de chaves MEMS .....	40
	4.5 Considerações Mecânicas sobre chave MEMS .....	43
	4.6 Considerações Elétricas sobre chave MEMS .....	51
	4.6.1 Modelo de chaves em Paralelo .....	51
	4.6.2 Modelo de chaves em Série .....	56
	4.7 Considerações de Projeto .....	58
<b>5</b>	<b>Chaves MEMS Capacitivas Paralelas sobre CPW .....</b>	<b>61</b>
	5.1 Software de simulação .....	61
	5.2 Guia de onda coplanar .....	64
	5.3 Modelagem da perda de retorno e isolamento .....	67
	5.4 Chave convencional .....	70
	5.5 Chaves otimizadas .....	76
<b>6</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>82</b>
	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>84</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

3G	Third Generation- Terceira geração
AFOSR	Air Force Office of Scientific Research – Área de pesquisa científica da Força Aérea americana
APCVD	Atmosferic Pressure Chemical Vapor Deposition – Deposição química por vapor a pressão atmosférica
BAW	Bulk Acoustic Wave - Onda Acústica de Substrato
CAD	Computer Aided Design – Projeto Auxiliado por Computador
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor – Semicondutor metal-óxido complementar
CPW	Coplanar Waveguide – Guia de Onda coplanar
CVD	Chemical Vapor Deposition - Deposição Química a vapor
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency – Agência de projetos de pesquisa avançada de defesa
DC	Direct Current – Corrente direta
DoD	Department of Defense – Departamento de Defesa
DMD	Digital Micromirror Devices – Dispositivos de Microespelho Digital
DRIE	Deep Reactive Ion Etching – Corrosão profunda com íon reativo
EDA	Electronic Design and Automation – Automação de Projetos Eletrônicos
FET	Field-Effect Transistor - Transistor de efeito de campo
FVTD	Finite Volume Time Domain – Método de Volumes Finitos no Domínio do Tempo
HERMIT	Harsh Enviroment Robust Micromechanical Techonology – Tecnologia microeletromecânica robusta para ambientes hostis

IC	Integrated circuit – circuito integrado
IP	Internet Protocol – Protocolo de Internet
LCS	Laboratório de Comunicações e Sinais
LCP	Liquid Crystal Polymer – Polímero de Cristal Líquido
LIGA	Lithographie, Galvanoformung, Abformung – Litografia, Eletroformação e Moldagem
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition – Deposição química por vapor a baixa pressão
MEMS	Microelectromechanical Systems – Sistemas Microeletromecânicos
MESFET	Metal-Semiconductor-Field-Effect-Transistor – Transistor de Efeito de campo metal semiconductor
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuits
MOEMS	MicroOptoElectroMechanical Systems – Sistemas Microoptoeletromecânicos
MST	Microsystems Technology – Tecnologia de Microsistemas
NIST	National Institute of Standard and Technology – Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia
NEMS	Nanoelectromechanical Systems – Sistemas Nanoeletromecânicos
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition - Deposição Química a vapor aprimorada com plasma
PIN	P-Intrinsic-N
PVD	Physical Vapor Deposition - Deposição Física por vapor
R&D	Reserach & Development – Pesquisa e Desenvolvimento
RIE	Reactive Ion Etching – Corrosão com íon reativo
RF	Radio-frequency - Rádio-frequência
RFIC	Radio Frequency Integrated Circuits – Circuitos integrados de Rádio-Frequência
SD	Spectral Domain – Domínio Espectral
SPNT	Single Pole N-Throw – Pólo simples múltiplas posições
SPST	Single Pole Single Throw – Pólo simples uma posição
VSWR	Voltage Standing-Wave ratio – relação de tensão da onda estacionária

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Classificação da micro-tecnologia .....	3
Figura 1.2	Estrutura do mercado de MEMS .....	6
Figura 1.3	Perspectivas do faturamento de MEMS de RF por aplicações .....	7
Figura 1.4	Curva de adoção de novas tecnologias ( <i>Hype Cycle</i> ) .....	10
Figura 2.1	Classificação de sistemas eletromecânicos .....	14
Figura 4.1	Circuitos SPST ideais .....	33
Figura 4.2	Modelos de circuitos de SPST utilizando um dispositivo de chaveamento não-ideal de impedância $Z_D$ .....	34
Figura 4.3	Chave série em com um eletrodo .....	40
Figura 4.4	Seção transversal de Chave em série .....	41
Figura 4.5	Seção transversal de uma chave em paralelo .....	41
Figura 4.6	Vista do plano superior de uma chave em paralelo .....	41
Figura 4.7	Esforços solicitantes sobre a chave para determinação de $k'+k''$ .....	44
Figura 4.8	Distribuição de carga em uma membrana montada sobre um CPW .....	46
Figura 4.9	Gráfico da altura da barra versus tensão aplicada .....	48
Figura 4.10	Circuito equivalente de uma chave em paralelo .....	51
Figura 4.11	Chave em Paralelo capacitiva desenvolvida pela Raytheon .....	56
Figura 4.12	Circuito equivalente de uma chave em série .....	56
Figura 4.13	Chave em série desenvolvida pelo Rockwell Science Center .....	58
Figura 5.1	Guia de onda coplanar .....	65
Figura 5.2	Transformação conforme para o plano CPW .....	65
Figura 5.3	Circuito equivalente da chave MEMS em paralelo .....	67
Figura 5.4	Isolação e perda de retorno em função da frequência indicando $f_{max}$ e $f_{min}$ para $PR_{min} = 10$ dB e $I_{min} = 15$ dB .....	71
Figura 5.5	Isolação e perda de retorno em função da frequência indicando $f_{max}$ , $f_{min}$ para $PR_{min} = I_{min} = 20$ dB e o ponto de cruzamento das curvas ...	72
Figura 5.6	Isolação e perda de retorno em função da frequência indicando $f_{max}$ ,	

	$f_{min}$ para $PR_{min} = I_{min} = 20$ dB e ponto de cruzamento das curvas com indutância .....	73
Figura 5.7	Isolação e perda de retorno em função da frequência indicando $f_{max}$ , $f_{min}$ para $PR_{min} = I_{min} = 20$ dB e ponto de cruzamento das curvas com indutância e resistência .....	74
Figura 5.8	Perda de retorno no estado não atuado (em dB) para chave convencional medida e simulada com EM3DS .....	75
Figura 5.9	Isolação no estado atuado (em dB) para chave de convencional medida e simulada com EM3DS .....	75
Figura 5.10	Estrutura da chave otimizada .....	77
Figura 5.11	Perda de retorno da chave otimizada no estado não atuado (em dB)	78
Figura 5.12	Isolação da chave otimizada no estado atuado (em dB) .....	78
Figura 5.13	Perda por inserção da chave otimizada no estado atuado (em dB) ..	79
Figura 5.14	Estrutura da chave otimizada com capacitância distribuída .....	80
Figura 5.15	Perda de retorno para chave otimizada com capacitância distribuída no estado não atuado (em dB) .....	80
Figura 5.16	Isolação para chave otimizada com capacitância distribuída no estado atuado (em dB) .....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Oportunidades para componentes MEMS RF .....	32
Tabela 4.1	Capacidade de potência para configurações do circuito de chaveamento SPST .....	35
Tabela 4.2	Comparação entre chaves de RF .....	37