

Um modelo  
eficiente do  
transistor  
MOS para o  
projeto de  
circuitos VLSI

Osmar F.  
Siebel

Introdução

Projeto de  
Circuitos  
Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a  
validação do  
modelo

Teste de  
velocidade

Comentários  
Finais

# Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar Franca Siebel  
Carlos Galup-Montoro (Orientador)

Universidade Federal de Santa Catarina  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Laboratório de Circuitos Integrados  
<http://eel.ufsc.br/~lci/>

Março, 2007

# Sumário

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

- 1 Introdução
- 2 Projeto de Circuitos Integrados
- 3 Modelos
- 4 ACM
- 5 Implementação
- 6 Testes para a validação do modelo
- 7 Teste de velocidade
- 8 Comentários Finais

# Introdução

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

- 1 Introdução
- 2 Projeto de Circuitos Integrados
- 3 Modelos
- 4 ACM
- 5 Implementação
- 6 Testes para a validação do modelo
- 7 Teste de velocidade
- 8 Comentários Finais

# Aumento constante do desempenho

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

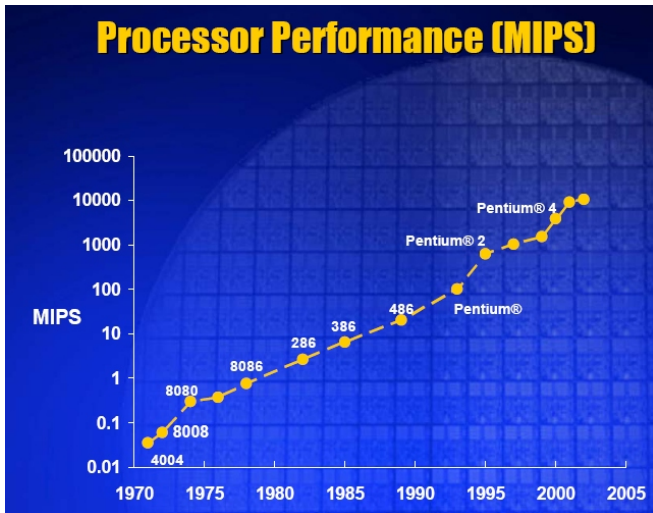
ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários  
Finais



# Miniaturização

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

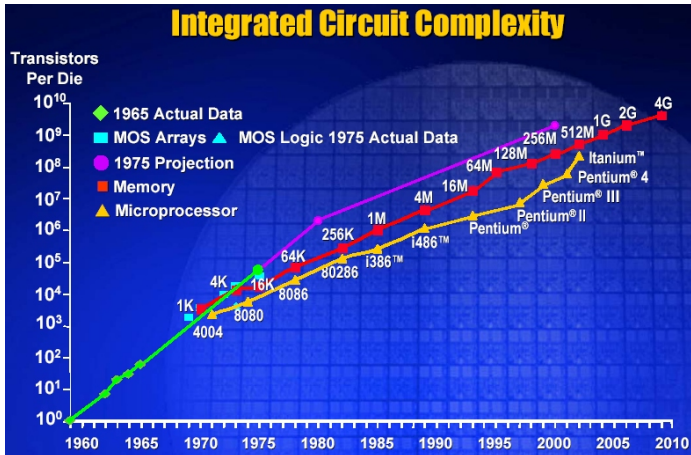
ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais



# Projeto de Circuitos Integrados

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

- 1 Introdução
- 2 Projeto de Circuitos Integrados**
- 3 Modelos
- 4 ACM
- 5 Implementação
- 6 Testes para a validação do modelo
- 7 Teste de velocidade
- 8 Comentários Finais

# Projeto de Circuitos Integrados

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

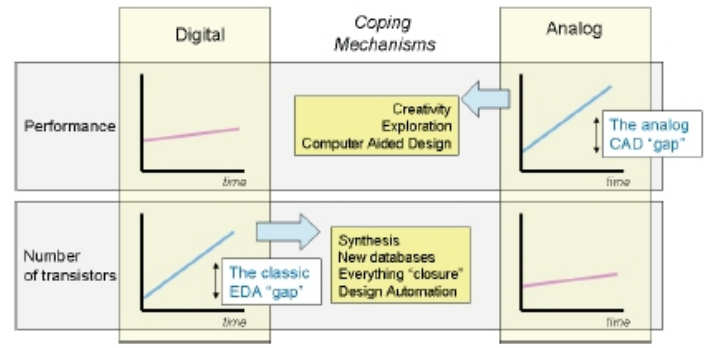
ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários  
Finais



# Simulação

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários  
Finais

## Importância

Uma etapa padrão e fundamental no projeto de circuitos integrados.

## Tipos

Simulação Comportamental, digital e **no nível do transistor**.

## Características

O resultado da simulação está diretamente ligado à qualidade do simulador e do modelo utilizado.



# Modelos

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

**Modelos**

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

- 1 Introdução
- 2 Projeto de Circuitos Integrados
- 3 Modelos**
- 4 ACM
- 5 Implementação
- 6 Testes para a validação do modelo
- 7 Teste de velocidade
- 8 Comentários Finais

# Modelos Compactos

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

## Características:

- Descrevem o comportamento do transistor MOS através de equações.
- Devem ser precisos, eficientes, baseados em princípios físicos e com o mínimo de parâmetros.

## Podem ser divididos em:

- Modelos baseados em  $V_T$ : BSIM3, BSIM4 e MM9;
- Modelos baseados em carga ( $Q_I$ ): ACM, EKV, BSIM5;
- Modelos baseados em  $\phi_S$ : MM11, SP, HiSIM e PSP;

# Modelos baseados em $V_T$

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

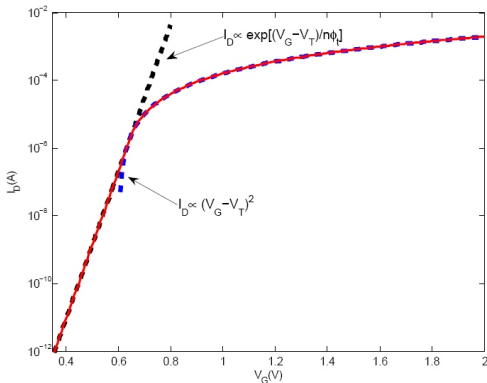
ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais



## ■ Problemas:

- Inversão Moderada;
  - Simetria Dreno-fonte.
- 
- “Bom” modelo digital para tecnologias até 90 nm
  - “Bom” modelo analógico para tecnologias até 180 nm

# Modelos Compactos - Nova geração

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

Modelos  $\Phi_S$  (Brews - 1978)

$$I_D = -\mu_n \frac{W}{L} \int_{\phi_{s0}}^{\phi_{sL}} Q'_I(\phi_s) \frac{dV_C}{d\phi_s} d\phi_s$$

Pao-Sah (1966)

$$I_D = \mu_n \frac{W}{L} \int_{V_S}^{V_D} (-Q'_I) dV_C$$

Modelos  $Q'_I$

$$I_D = -\mu_n \frac{W}{L} \int_{Q'_{IS}}^{Q'_{ID}} Q'_I \frac{dV_C}{dQ'_I} dQ'_I$$

# Advanced Compact MOSFET

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

**ACM**

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

- 1 Introdução
- 2 Projeto de Circuitos Integrados
- 3 Modelos
- 4 ACM**
- 5 Implementação
- 6 Testes para a validação do modelo
- 7 Teste de velocidade
- 8 Comentários Finais

# Características

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

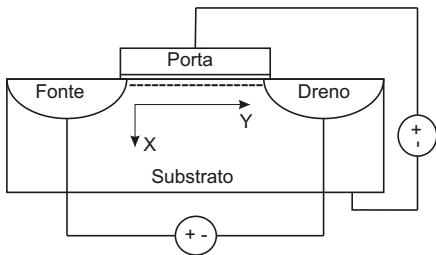
Comentários Finais

- Desenvolvido no LCI-UFSC;
- Modelo baseado em carga;
- Expressões simples, contínuas e infinitamente deriváveis; ( $C^\infty$ )
- Reduzido número de parâmetros;
- Preserva a simetria dreno-fonte;
- Conserva a carga;
- Inclusão de efeitos de pequena geometria (DIBL, CLM) e saturação da velocidade.

# Aproximação do canal gradual

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} \gg \frac{\partial F_y}{\partial y}$$

Permite a divisão de um problema 2-D em dois 1-D



**Campo Elétrico Vertical controla a carga no canal semiconductor.**

**Campo Elétrico Longitudinal controla o fluxo de carga (corrente).**

# Solução 1-D-x

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

$$Q'_C = \pm \gamma C'_{ox} \sqrt{\phi_t [e^{-\phi_s/\phi_t} - 1] + \phi_s + \phi_t [e^{(\phi_s - 2\phi_F)/\phi_t} - e^{-2\phi_F/\phi_t}]}$$

pela aproximação de folha de carga e de depleção



$$Q'_B = -\gamma C'_{ox} \sqrt{\phi_s - \phi_t}$$

da equação do balanço de potencial

$$V_{GB} - V_{FB} = \phi_s - \frac{Q'_I + Q'_B}{C'_{ox}}$$



$$Q'_I = -C'_{ox} \left( V_G - V_{FB} - \phi_s + \gamma \sqrt{\phi_s - \phi_t} \right)$$



# Linearização de $Q'_I$

$$Q'_I = -C'_{ox} \left( V_G - V_{FB} - \phi_s + \gamma \sqrt{\phi_s - \phi_t} \right)$$

Expandindo em série de potência em torno de  $\phi_{sa}$

$$\phi_{sa} = \left[ \sqrt{V_G - V_{FB} - \phi_t + \frac{\gamma^2}{4}} - \frac{\gamma}{2} \right] + \phi_t$$



$$Q'_I = nC'_{ox}(\phi_s - \phi_{sa})$$

$$dQ'_I = nC'_{ox} d\phi_s$$

Aproximação Fundamental do Modelo ACM

# Solução 1-D-y

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

$$\begin{cases} I_D = -\mu_n \frac{W}{L} \int_{Q'_{IS}}^{Q'_{ID}} Q'_I \frac{dV_C}{dQ'_I} dQ'_I \\ dQ'_I \left( \frac{1}{nC'_{ox}} - \frac{\phi_t}{Q'_I} \right) = dV_C \end{cases}$$



$$I_D = -\mu_n \frac{W}{L} \left[ \frac{Q'_{ID}{}^2 - Q'_{IS}{}^2}{2nC'_{ox}} - \phi_t(Q'_{ID} - Q'_{IS}) \right]$$

# Cálculo carga

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

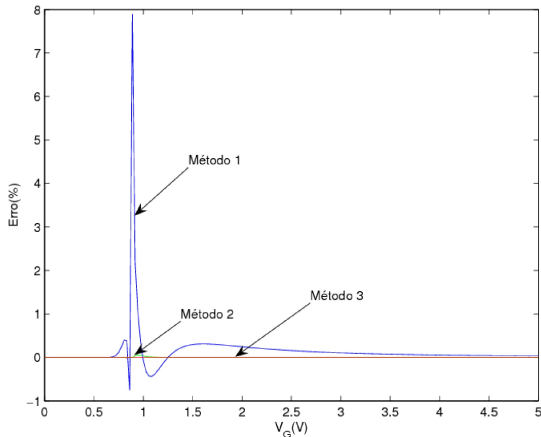
Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

$$\frac{V_P - V_{S(D)}}{\phi_t} = \frac{Q'_{IP} - Q'_{IS(D)}}{nC'_{ox}\phi_t} + \ln\left(\frac{Q'_{IS(D)}}{Q'_{IP}}\right)$$



# Comparação

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

Circuito	ACM3	ACM2
Schmitfast	CPU time=18s070ms	CPU time=19s390ms
	Global CPU time=18s070ms	Global CPU time=19s390ms
Schmitslow	CPU time=22s640ms	CPU time=25s860ms
	Global CPU time=22s660ms	Global CPU time=25s860ms

# Implementação

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

**Implementação**

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

- 1 Introdução
- 2 Projeto de Circuitos Integrados
- 3 Modelos
- 4 ACM
- 5 Implementação**
- 6 Testes para a validação do modelo
- 7 Teste de velocidade
- 8 Comentários Finais

# Implementação

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

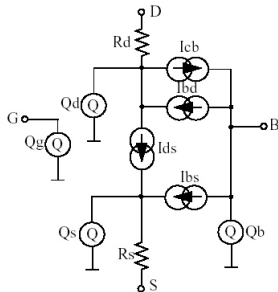
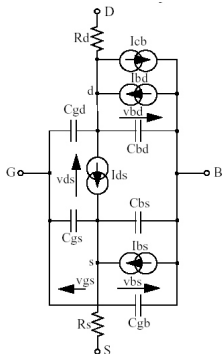
Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

- Implementado no simulador elétrico ELDO (Mentor Graphics).
- Utilizando a ferramenta UDM (User Definable Models).
- Escrito em linguagem C.
- Modelo capacitivo ( $XQC > 0.5$ ) e modelo de carga ( $XQC \leq 0.5$ )



# Parâmetros ACM

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

Parâmetro	Descrição	Unidade
U0	Mobilidade	$m^2/Vs$
TOX	Espessura do óxido	m
VT0	Tensão de Limiar	V
NA	Concentração dos portadores	$cm^{-3}$
PHI	Potencial de Superfície	V
GAMMA	Coefficiente do Efeito de Corpo	$\sqrt{V}$
LAMBDA	Coefficiente CLM	-
THETA	Redução da mobilidade (Campo transversal)	$1/V$
M	Redução da mobilidade (temperatura)	-
VMAX	Velocidade de saturação	m/s
XJ	Profundidade da Junção	m
SIGMA	Coefficiente DIBL	$m^2$

# Teste para a validação do modelo

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

**Testes para a validação do modelo**

Teste de velocidade

Comentários Finais

- 1 Introdução
- 2 Projeto de Circuitos Integrados
- 3 Modelos
- 4 ACM
- 5 Implementação
- 6 Testes para a validação do modelo**
- 7 Teste de velocidade
- 8 Comentários Finais



# Teste de simetria de Gummel

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

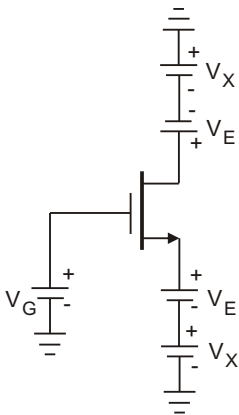
ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários  
Finais



- Corrente de dreno é uma função ímpar  
 $I_D(V_{DS}) = -I_D(-V_{DS})$
- $\left. \frac{\partial^n I_D}{\partial V_X^n} \right|_{V_X=0} = 0, \text{ para } n \text{ par}$

# Simulações ELDO - ACM

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

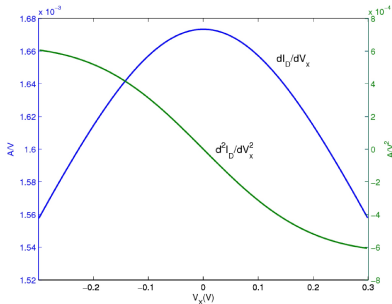
Implementação

Testes para a validação do modelo

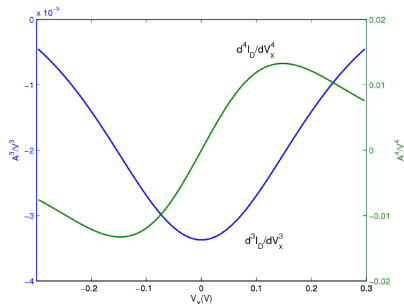
Teste de velocidade

Comentários Finais

## Primeira e segunda derivadas



## Terceira e quarta derivadas



# Simulações ELDO - HiSIM

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

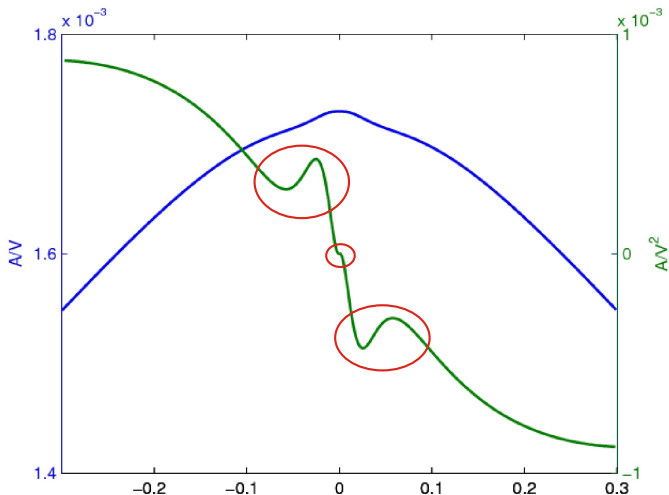
ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais



# Simulações ELDO - PSP

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

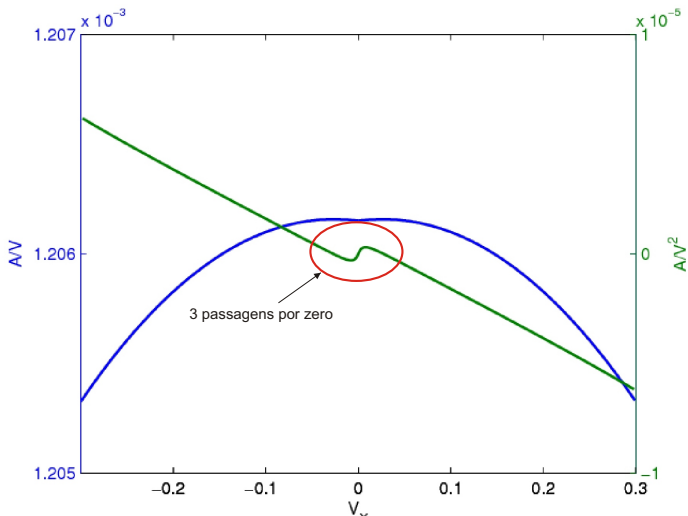
ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais



# Simulações ELDO - EKV

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

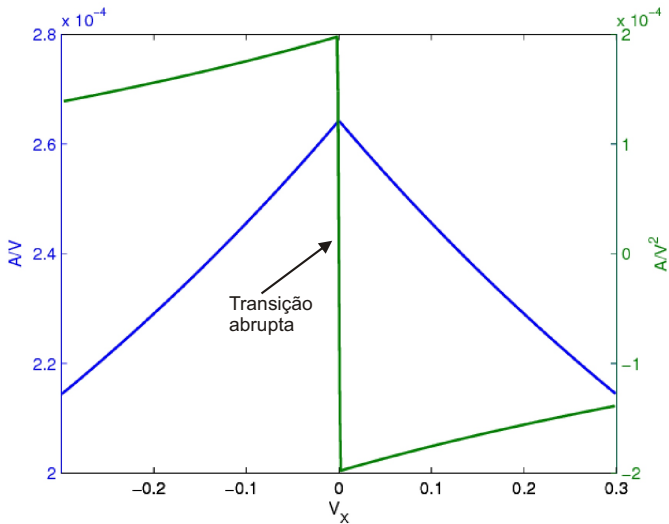
ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais



# Capacitâncias

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

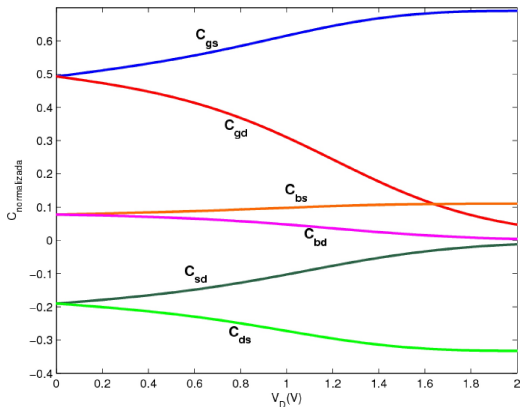
ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais



$$C_{gs(d)} = \frac{2C_{ox}}{3} \left[ 1 - \frac{Q'_{R(F)}{}^2}{(Q'_F + Q'_R)^2} \right] \left[ 1 + \frac{nC'_{ox}\phi_t}{Q'_{F(R)}} \right]$$

# Capacitor Chaveado

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

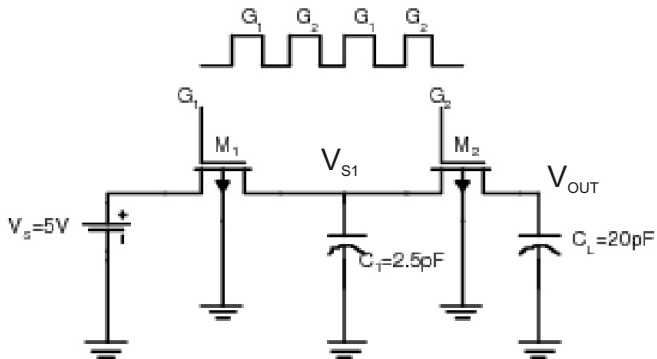
ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais



# Simulações ELDO - ACM

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

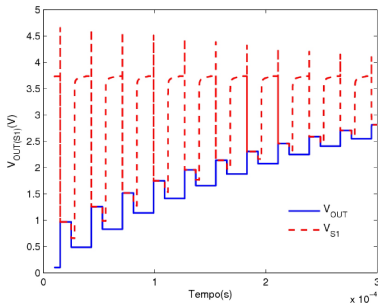
Implementação

Testes para a validação do modelo

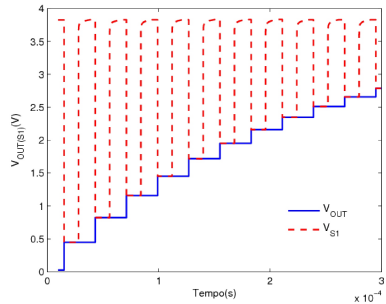
Teste de velocidade

Comentários Finais

ACM carga ( $XQC \leq 0.5$ )



ACM capacitivo ( $XQC > 0.5$ )





# Simulações ELDO - MM11

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

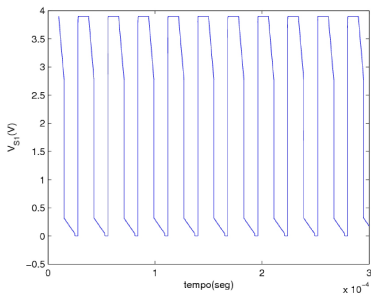
Implementação

Testes para a validação do modelo

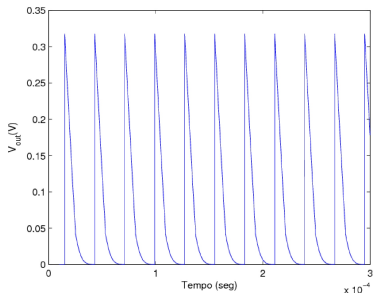
Teste de velocidade

Comentários Finais

## MM11 - VS1



## MM11 - VOUT



# Teste de velocidade

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

**Teste de velocidade**

Comentários Finais

- 1 Introdução
- 2 Projeto de Circuitos Integrados
- 3 Modelos
- 4 ACM
- 5 Implementação
- 6 Testes para a validação do modelo
- 7 Teste de velocidade**
- 8 Comentários Finais

# Funções High-Cost

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

Funções High-Cost	ACM	<i>HiSIM</i>	<i>PSP</i>	<i>HiSIM</i>	<i>PSP</i>
exp	2	28	123	38	57
log	6	12	68	21	37
pow	3	29	158	28	77
sqrt	11	59	241	68	96
TOTAL	22	138	688	155	267

# Teste de velocidade

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

Circuito	$ACM_{cap}$	ACM	EKV	MM11	HiSIM	PSP	BSIM4
schmitfast	1s580ms	1.02	0.84	2.14	1.63	1.87	1.16
schmitslow	2s430ms	1.00	0.70	1.75	1.60	1.93	1.28
g1310	640ms	0.98	0.92	1.28	1.23	1.31	1.19
hussamp	3s020ms	1.07	1.11	1.02	1.06	1.11	1.06
ab_ac	1s400ms	1.03	1.02	2.35	1.63	1.86	1.25
ab_integer	1s370ms	1.00	0.98	1.09	1.01	1.13	0.98

# Comentários Finais

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

- 1 Introdução
- 2 Projeto de Circuitos Integrados
- 3 Modelos
- 4 ACM
- 5 Implementação
- 6 Testes para a validação do modelo
- 7 Teste de velocidade
- 8 Comentários Finais**

# Comentários Finais

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

- Fortemente baseado em princípios físicos.
- Indicado para o projeto de circuitos:
  - cálculo à mão (expressões simples, número reduzido de parâmetros)
  - simulações
- Didático (fácil visualização de comportamentos assintóticos)
- Consistente e veloz.

# Perspectivas de trabalhos futuros

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários Finais

- Extração de parâmetros
- Implementação do modelo não quasi-estático
- Inclusão do modelo de ruído e de mismatch
- Modelamento e inclusão de efeitos quânticos

# Bibliografia

Um modelo eficiente do transistor MOS para o projeto de circuitos VLSI

Osmar F. Siebel

Introdução

Projeto de Circuitos Integrados

Modelos

ACM

Implementação

Testes para a validação do modelo

Teste de velocidade

Comentários  
Finais

- [1] Gordon E. Moore, No exponential is forever ..., International Solid State Circuits Conference (ISSCC) 2003
- [2] D.B.M. Klaassen. Comments on the Perspective of a Commercial SPICE Vendor. Novembro, 2005.