

TESE

686





Ministério da Educação
ESCOLA - FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917



A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 337 de 20/10/92, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "Modelagem de Transitores de Efeito de Campo MOS de Fortalecimento - Um Estado da Arte" apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração de Eletrônica, satisfeitas as demais exigências regimentais, a Paulo César Crepaldi.

Itajubá, 27 de Outubro de 1992.

Prof. Wilmar Bueno de Moraes
1º Examinador - UNICAMP

Prof. Paulo Sizuo Waki
2º Examinador - EFEI

Prof. Laércio Caldeira
3º Examinador - EFEI - Orientador



Ministério da Educação
 ESCOLA - FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
 Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação "MODELAGEM DE TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO MOS DE FORTALECIMENTO - UM ESTADO DA ARTE"

Autor: Paulo César Crepaldi

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A+	
2º	A+	
3º	A+	
4º	x-x-x-x-x-x-x-x-x	x-x-x-x-x-x-x-x-x

Resultado Médio: Conceito A+, ou seja, aprovado com distinção

Observações: De acordo com a decisão da banca, o título da dissertação foi alterado para: "Modelagem de Transistores de Efeito de Campo MOS de Fortalecimento em Estado da Arte".

Itajubá, 20 de Outubro de 1992.

Prof. Wilmar Bueno de Moraes
 1º Examinador - UNICAMP

Prof. Paulo Sizuo Waki
 2º Examinador - EFEI

Prof. Laércio Caldeira
 3º Examinador - EFEI - Orientador

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



"MODELAGEM DE TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO
MOS DE ENRIQUECIMENTO - UM ESTADO DA ARTE"

PAULO CÉSAR CREPALDI

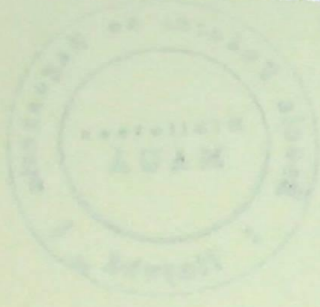
ORIENTADORES:

PROF. MSC. LAÉRCIO CALDEIRA

PROF. DR. PAULO SIZUO WAKI

ITAJUBÁ
1992

CLASS. 621.382.3(043.2)
CUTT. C 917 m
TOMBO. 686



A tecnologia de fabricação de circuitos integrados VLSI e ULSI vem apresentando ao longo dos anos um crescente aprimoramento no sentido de se reduzirem as dimensões dos dispositivos a escalas submicrométricas.

Surge, paralelamente a este desenvolvimento dos processos de fabricação, uma necessidade de um desenvolvimento na caracterização das propriedades elétricas destes dispositivos, o que justifica a grande e acentuada atenção que a modelagem também vem recebendo ao longo destes anos.

Este trabalho tem como objetivo proceder a um levantamento do estado da arte na modelagem de MOSFETs, particularmente os do tipo enriquecimento, que são extensivamente utilizados como elementos básicos na elaboração de sistemas e subsistemas integrados.

Adicionalmente, procurar-se-á estabelecer uma base de dados consistente no sentido de se propiciar aos pesquisadores relacionados com a área de modelagem de dispositivos semicondutores uma visão adequada, tanto para o desenvolvimento de novos projetos de pesquisa quanto para servirem de fonte de consulta.

Finalmente, pretende-se que esta obra possa ser a base de uma nova linha de trabalho na Escola Federal de Engenharia de Itajubá, principalmente junto ao grupo de microeletrônica.

The manufacturing technology of VLSI and ULSI Integrated Circuits has been presenting increasing development, throughout the years, in order to reduce the device size to the submicrometer range.

In parallel with the manufacturing process development, there is a need for developing the characterization of the electrical properties of such devices, thus justifying the great attention and emphasis which has been given to modelling along those years.

This work intends to do a survey of the state-of-the-art in MOSFET modelling, particularly of the enhancement type, which are extensively used as basic elements in manufacturing of integrated systems and subsystems.

Additionally, it is tried to establish a consistent data base, so as to provide researchers in the field of semiconductor device modelling with an adequate view, to be used both in the development of new research projects and as a source of reference.

Finally, this work intends to be a motivation for a new kind of study in EFEI, specially in the microelectronics group.

Aos meus pais, Mário e June, exemplos de dedicação e honra;

À minha esposa, Yvelise, exemplo de amor e respeito;

Aos meus orientadores, Laércio e Paulo, pelo profissionalismo e pelo carinho de me considerarem um amigo;

Ao casal Paulo Rosa e Lizete, pelo privilégio que o destino me reservou de tê-los como amigos;

Ao amigo Egon Müller, pelo incentivo e pelo apoio em minhas atividades didáticas junto ao Departamento de Eletrônica da EFEI;

A Anchieta Nogueira pelos desenhos das figuras;

Aos funcionários da Biblioteca Mauá e da Biblioteca do CPqD da Telebrás, pelo apoio nas pesquisas bibliográficas.

Dedico esta obra a todos aqueles que acreditam, no seu mais profundo eu, ser a busca da verdade o caminho mais simples de se descobrir e compreender Deus.

α, α_1	parâmetros de ajuste;
α_E	parâmetro de redução da mobilidade em função do campo elétrico transversal;
$\alpha_{n,p}$	coeficientes de ionização;
$\alpha_{n,p}^\infty$	parâmetros de ajuste;
b	campo elétrico crítico para as Eqs. de $\alpha_{n,p}$;
β, β_1, θ	parâmetros de ajuste;
$C_{n,p}$	coeficientes de Auger;
C_{ox}	capacitância do óxido;
CI	circuito integrado;
$D_{n,p}$	difusividade dos elétrons, lacunas;
ϵ	permissividade elétrica;
$\epsilon_{si,o}$	permissividade elétrica do silício, vácuo;
\vec{E}	vetor campo elétrico;
$E_{ }$	componente longitudinal do campo elétrico;
E_{\perp}	componente transversal do campo elétrico;
$E_{fn,p}$	níveis de Fermi dos elétrons, lacunas;
E_{cr}	campo elétrico crítico

E_A	nível de energia dos dopantes aceitadores;
E_D	nível de energia dos dopantes doadores;
E_C	nível de energia da base da banda de condução;
E_V	nível de energia do topo da banda de valência;
ψ	potencial elétrico;
$G_{1/2}$	função inversa de Fermi de ordem 1/2;
$\vec{J}_{n,p}$	vetores densidade de corrente para elétrons, lacunas;
K	constante de Boltzmann;
n	concentração de elétrons;
n_i	concentração intrínseca de portadores;
$\mu_{n,p}$	mobilidade dos elétrons, lacunas;
μ_{\min}	mobilidade mínima;
μ_{eff}	mobilidade efetiva;
μ_{\max}	mobilidade máxima;
μ_0	mobilidade a baixo campo;
L	comprimento do canal;
L_D	comprimento intrínseco de Debye;

MOS	Metal-Oxide-Semiconductor;
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor;
N	concentração genérica de dopantes;
N_A	concentração de átomos aceitadores;
N_D	concentração de átomos doadores;
N_A^-	concentração de átomos aceitadores ionizados;
N_D^+	concentração de átomos doadores ionizados;
N_T	concentração total de átomos dopantes;
N_{ref}	concentração de referência;
N_C	densidade de estados quânticos permitidos, a elétrons, na banda de condução;
N_V	densidade de estados quânticos permitidos, a lacunas, na banda de valência;
p	concentração de lacunas;
q	carga elementar;
ρ	densidade volumétrica de cargas;
R	taxa líquida de geração e recombinação;
t_{ox}	espessura do dióxido de silício;

$\tau_{n,p}$	tempo de vida dos elétrons, lacunas;
T	temperatura absoluta;
V_{sat}	velocidade de saturação;
$\vec{v}_{n,p}$	vetores velocidade dos portadores;
ULSI	Ultra Large Scale of Integration;
U_x	potenciais normalizados em unidades de $K.T/q$;
VLSI	Very Large Scale of Integration;
V_{FB}	tensão de "Flat Band";
x_q	profundidade das difusões do Dreno e da Fonte;
x_d	profundidade da região de depleção sob a região do canal;
x_D	profundidade da região de depleção sob a região do Dreno;
x_S	profundidade da região de depleção sob a região da fonte;
y_D	largura da região de depleção na superfície da interface $S_i - SiO_2$ (lado do Dreno);
y_S	largura da região de depleção na superfície da interface $S_i - SiO_2$ (lado da Fonte);
W	largura do Canal;

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Dedicatória.....	iv
Lísta de Símbolos.....	v
Sumário.....	ix

ÍNDICE GERAL

CAPÍTULO I CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 Introdução.....	1
1.2 Os transistores MOS.....	2
Um Breve Histórico.....	2
MOS e VLSI.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Fontes da Pesquisa Bibliográfica.....	6
1.5 Apresentação do Trabalho.....	6

CAPÍTULO II MODELAGEM DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES

2.1 Aspectos Gerais.....	8
2.2 Equações Básicas.....	10
2.3 Parâmetros Físicos.....	13
Modelagem da Carga Espacial.....	13
Modelagem da Mobilidade dos Portadores.....	15
Modelagem da Geração, Recombinação de Portadores.....	18

CAPÍTULO III MODELOS DIMENSIONAIS PARA O MOSFET

3.1 Modelo Uni-Dimensional.....	22
3.2 Modelos Bi e Tri-Dimensionais.....	23
3.3 Efeitos da geometria.....	24
Modulação do Comprimento do Canal.....	24
Saturação da Velocidade.....	25
Degradação da Mobilidade.....	26
"Hot Electrons" e "Hot Holes".....	26
Deslocamento da Tensão de Limiar.....	27
3.4 Aspectos das Soluções Numéricas.....	29

CAPÍTULO IV REVISÃO DOS MODELOS

4.1	Introdução.....	31
4.2	Síntese do Conhecimento.....	34
	Modelagem Analítica.....	35
	Modelos analíticos de transistores MOS de canal longo.....	36
	Modelos analíticos de transistores MOS de canal curto e/ou estreito.....	39
	Modelos Analíticos para a Região de Sublimiar....	54
	Modelos Analíticos Intrinsecamente de Ordem Superior.....	56
	Outras Contribuições Dentro da Modelagem Analítica.....	56
	Modelagem Numérica.....	57

CAPÍTULO V COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

	Modelagem.....	60
	Modelagem Numérica.....	62
	Modelagem Analítica.....	66
	Um Panorama da Modelagem de Dispositivos no Brasil.....	74

CAPÍTULO I

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo serão abordados aspectos gerais relacionados ao desenvolvimento deste trabalho. Enfoca-se, principalmente, considerações sobre o dispositivo escolhido, bem como os objetivos que motivaram e nortearam a realização desta obra.

1.1 Introdução

Ao longo dos últimos anos, o rápido desenvolvimento dos dispositivos miniaturizados para circuitos integrados e da tecnologia a eles associada aumentaram, de forma dramática, a demanda por modelos capazes de predizerem os vários passos do processo de fabricação e o comportamento elétrico destes dispositivos [1],[2].

Para circuitos de complexidade VLSI e ULSI, as condições de processo estão intimamente relacionadas com o comportamento elétrico [2],[3]. Portanto, os desenvolvimentos de

dispositivos e de processos devem ser executados simultaneamente, e a modelagem de dispositivos deve auxiliar este tratamento iterativo economizando parte dos ciclos [4]. Isto permitirá que novas estruturas e/ou novas tecnologias tenham seus impactos, quanto às características elétricas, rigorosamente avaliados e investigados antes de suas efetivas fabricações [1],[5].

Neste ponto, a modelagem de dispositivos assistida por computador torna-se obrigatória [4] e, com o crescimento da capacidade dos equipamentos existentes juntamente com o desenvolvimento de novos métodos numéricos, configura-se uma área de pesquisa bastante interessante, tanto do ponto de vista tecnológico quanto científico [1],[3],[4]. Por outro lado, a dificuldade encontrada na realização de medidas de caráter elétrico em dispositivos integrados tem propiciado o aparecimento de métodos teóricos para a caracterização destes dispositivos.

1.2 Os transistores MOS

Um Breve Histórico

Os avanços tecnológicos do MOSFET podem ser cronologicamente divididos em três fases [25]:

- (i) Uma fase de descoberta durante o período de 1928 a 1958;

(ii) Uma fase de desenvolvimento tecnológico e novas propostas de estruturas do dispositivo entre 1959 e 1968;

(iii) Uma fase de integração do transistor MOS e a manufatura de circuitos integrados de 1969 até os dias de hoje.

Pode-se atribuir o início da fase (i) aos requerimentos de patentes feitos por Lilienfeld durante os anos de 1926 a 1928, quando foram propostas as primeiras estruturas onde a condutividade de uma fina camada de semiconductor era controlada pelo efeito de um campo elétrico transversal. Contudo, a fase (i) realmente inicia-se por volta de 1947, nos Laboratórios BELL, através de Bardeen, Brattain e Shockley, quando a física básica que rege o comportamento dos transistores foi claramente compreendida e aplicada às novas estruturas emergentes.

A fase (ii) teve seu início em 1959, quando Atalla, Tannenbaum e Scheibner completaram, com sucesso, um projeto dos Laboratórios BELL, onde o objetivo específico era o de se encontrar um método de passivação para se estabilizar a superfície de silício usando-se o crescimento térmico do dióxido de silício.

As grandes conquistas desta fase foram o desenvolvimento da tecnologia de fabricação de dispositivos de silício e a invenção de novas estruturas e circuitos.

Finalmente, a fase (iii) iniciou-se com Noyce e Moore, em 1968, ao fundarem a INTEL CO., com um único objetivo em mente: produzir circuitos integrados MOS de silício. Desde então a produção de CIs vem sofrendo um constante aperfeiçoamento

nos aspectos tecnológicos e um crescente aumento no volume de produção.

MOS e VLSI(ULSI)

O constante progresso na litografia, tanto por feixe eletrônico quanto por radiação ultravioleta (fotolitografia), tem permitido a fabricação de MOSFETs com dimensões cada vez menores [26]. Por exemplo, "a revolução ULSI", introdutora de uma nova época na indústria eletrônica, tem proporcionado um progresso que permite a fabricação de 10^7 a 10^8 transistores em uma mesma pastilha [7].

Estas reduções geométricas têm colocado os dispositivos MOS na dianteira das aplicações digitais, em especial nas tecnologias VLSI e ULSI, onde a densidade de integração e a alta velocidade de operação requerem o uso de transistores submicrométricos para se alcançar estes desempenhos [8],[9].

No momento em que centenas de milhares de transistores MOS são integrados em uma única pastilha, torna-se importante entender até mesmo os efeitos de ordem superior que afetam a operação básica destes dispositivos [2].

A modelagem desempenha, portanto, uma regra crucial no projeto de circuitos VLSI (ULSI), pois os resultados obtidos através das análises computacionais terão a precisão limitada diretamente pelos modelos utilizados.

1.3 Objetivos

Fica evidente, pelo exposto nos itens anteriores, que a modelagem de dispositivos submicrométricos, em particular os transistores MOS, é de vital importância para todos os sistemas que hoje podem ser considerados como sendo de alta tecnologia.

Este trabalho tem por objetivo obter um estado da arte da modelagem de transistores MOS de fortalecimento, onde se espera a obtenção dos seguintes resultados a nível da Escola Federal de Engenharia de Itajubá:

- (i) Estabelecimento das bases para um novo campo de projetos de pesquisa;
- (ii) Uma melhor definição das atividades na área de modelagem dentro do grupo de microeletrônica;
- (iii) Fornecer subsídios para a estruturação de cursos em nível de pós-graduação na área de microeletrônica;
- (iv) Cooperar para o desenvolvimento de softwares aplicativos à simulação de dispositivos e de circuitos elétricos.

De uma forma mais global, espera-se que o presente trabalho possa servir como ponto de referência para pesquisas na área de modelagem de MOSFETs.

1.4 Fontes da Pesquisa Bibliográfica

O trabalho de pesquisa para o levantamento da base de dados foi realizado com o apoio das bibliotecas do CPqD da Telebrás, da Universidade Estadual de Campinas e da Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

Como fontes de pesquisa foram utilizados os principais periódicos de publicação internacional e nacional, dentre os quais se podem destacar: Electrical and Electronics Abstracts, Current Papers in Electrical and Electronics Engineering, Engineering Index, Current Contents, Anais dos Congressos Brasileiros de Microeletrônica, Índice Nacional de Teses e outros.

A metodologia empregada consistiu em se fazer um cruzamento das informações colhidas dentre os vários periódicos pesquisados, estabelecendo assim a base de dados para o levantamento do estado da arte.

1.5 Apresentação do Trabalho

O trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, sendo que o Cap. I procura situar a importância do dispositivo escolhido, bem como estabelecer os objetivos principais.

Na sequência, no Cap. II, discutem-se as equações básicas que regem o comportamento dos dispositivos semicondutores.

No Cap III, apresentam-se as filosofias dos modelos dimensionais para o MOSFET.

No Cap. IV, realiza-se uma síntese do conhecimento, estabelecendo-se uma revisão dos modelos.

Ao término, o Cap. V conclui com uma avaliação crítica da modelagem de uma forma mais generalizada.

CAPÍTULO II

MODELAGEM DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES

Os dispositivos semicondutores caracterizam-se por apresentar dois tipos distintos de portadores de carga: elétrons e lacunas. Estes portadores estão sujeitos a mecanismos de condução regidos pela interação de muitos fenômenos que ocorrem a níveis microscópicos e macroscópicos dentro do cristal semiconductor. A função da modelagem é exprimir, dentro de um padrão de precisão pré-estabelecido, o comportamento do dispositivo como uma consequência da observação da história destas partículas.

2.1 Aspectos Gerais

Os modelos de dispositivos semicondutores podem ser classificados em dois grandes grupos: Modelos de Circuitos Equivalentes e Modelos Físicos [1].

Os modelos de circuitos equivalentes são derivados das propriedades elétricas dos dispositivos e estão

baseados em analogias feitas através de elementos de circuito.

São utilizados na área de projetos de circuitos que operam a pequeno sinal, onde os dispositivos disponíveis têm sido extensivamente caracterizados e apresentam um comportamento próximo ao linear [1],[11].

Este tipo de modelagem, entretanto, é geralmente limitado em sua aplicabilidade devido às dependências da frequência e da polarização dc, bem como do comportamento não linear de muitos dispositivos com relação aos níveis de sinal. Sua principal vantagem é a facilidade de implementação e análise [1].

Os modelos físicos baseiam-se na obtenção de soluções das equações que regem o transporte de portadores de carga em uma dada estrutura semicondutora, fornecendo uma descrição mais detalhada e profunda das propriedades elétricas do dispositivo.

Estes modelos são capazes de fornecer, intrinsecamente, resultados dc, transientes e resultados ac em regime permanente, não existindo nenhum requisito de mudança do modelo para obtenção de respostas em operações a pequeno sinal ou a grande sinal.

Em contraste com os modelos de circuitos equivalentes, os modelos físicos são de uma análise mais complexa, que normalmente é satisfeita com a utilização de computador [1],[11].

Considerando-se o maior rigor e a maior abrangência dos modelos físicos, optou-se pela concentração de esforços na direção deste último grupo de modelos.

2.2 Equações Básicas

Os modelos físicos são desenvolvidos a partir da equação de transporte de Boltzmann ou dos conceitos quânticos de transporte. Quando é feita uma aproximação para a equação de Boltzmann a partir da consideração de seus dois primeiros momentos, o conjunto de equações resultantes é denominado de equações clássicas do semicondutor.

Historicamente, as equações clássicas do semicondutor têm satisfeito a grande maioria dos modelos de dispositivos, enquanto que as soluções quânticas de transporte e de Boltzmann têm fornecido subsídios para um detalhamento físico mais profundo [1].

Entretanto, os trabalhos visando à obtenção de dispositivos de geometria muito pequena e os desenvolvimentos experimentais relacionados com MOSFETs de silício mostram claramente que as condições de transporte fora do equilíbrio desempenham um papel importante na determinação das características destes dispositivos. Como consequência, as técnicas quânticas de transporte e a equação de transporte de Boltzmann tornam-se mais realistas e significativas [1],[12].

As equações clássicas do semicondutor, também referidas como modelo "drift-difusão" de transporte de portadores, podem ser obtidas de uma solução aproximada para os dois primeiros momentos da equação de transporte de Boltzmann. Em termos gerais, estas equações envolvem somente as propriedades médias (macroscópicas) de um gás de portadores e fornecem uma descrição intrinsecamente local do transporte de cargas, com os portadores assumidos em equilíbrio com os campos aplicados [12]. Os modelos que utilizam esta aproximação requerem a solução

auto-consistente das equações a seguir [1],[13]:

(i) Equação de Poisson:

$$-\nabla^2 \psi = \rho / \epsilon \quad (2.1)$$

(ii) Equações de Continuidade:

$$\partial n / \partial t = (1/q) \cdot \nabla \cdot \vec{J}_n - R \quad (2.2)$$

$$\partial p / \partial t = (1/q) \cdot \nabla \cdot \vec{J}_p - R \quad (2.3)$$

(iii) Densidades de Corrente:

$$\vec{J}_n = q \cdot n \cdot \vec{v}_n + q \cdot D_n \cdot \nabla n \quad (2.4)$$

$$\vec{J}_p = q \cdot p \cdot \vec{v}_p + q \cdot D_p \cdot \nabla p \quad (2.5)$$

Alternativamente, as Eqs (2.4) e (2.5), que relacionam as densidades de corrente, podem ser expressas através de relações que incorporem a mobilidade dos portadores [1],[14]:

$$\vec{J}_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot [\vec{E} + (1/n) \cdot \nabla (n \cdot K \cdot T / q)] \quad (2.6)$$

$$\vec{J}_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot [\vec{E} + (1/p) \cdot \nabla(p \cdot K \cdot T/q)] \quad (2.7)$$

Particularmente, as relações de densidade de corrente, que são as mais complexas do conjunto básico de equações do dispositivo semicondutor, são as que sofrem as maiores críticas no sentido de necessitarem de uma fundamentação física mais rigorosa [14].

Uma forma de abordagem do modelamento destas equações que têm crescido em popularidade e sofisticação, é a simulação através do método de Monte Carlo, uma técnica numérica estatística para solução de problemas físicos e matemáticos [1],[15].

Este método aplicado ao transporte de cargas em semicondutores trata da simulação de um grande número de portadores submetidos a forças externas (Campo Elétrico) e a mecanismos de espalhamento.

A trajetória de um portador consiste em uma sequência de vôos livres balísticos ("free flights") terminados por colisões (Eventos de Espalhamento). A duração de cada "free flight" e o tipo de espalhamento são selecionados estocasticamente, segundo modelos probabilísticos que descrevem os processos microscópicos.

Tudo transcorre como se cada partícula fosse estudada individualmente, sendo "seguida" ao longo de sua trajetória possibilitando, assim, um conjunto completo de informações que incluem posição, momento e energia destes portadores. Estes dados podem ser devidamente avaliados em seus valores médios obtendo-se densidades locais de portadores e funções de distribuição de uma forma similar às fornecidas por modelos macroscópicos como, por exemplo, o "drift-diffusion".

Devido à sua natureza intrínseca, o método de Monte Carlo fornece uma descrição microscópica dos fenômenos físicos de transporte e, além disto, está estruturado de modo que novos e/ou mais sofisticados modelos de espalhamento possam ser facilmente incorporados [16].

2.3 Parâmetros Físicos

As equações apresentadas na seção anterior incluem um conjunto de parâmetros que devem ser modelados apropriadamente de modo a descrever corretamente os fenômenos de transporte de forma qualitativa e quantitativa [14].

Modelagem da Carga Espacial

A Eq.(2.1) de Poisson requer um modelo para a carga espacial ρ que faça uso somente de variáveis dependentes (ψ, n, p) e das propriedades do material. Uma aproximação bem estabelecida para este modelo é a soma das concentrações, com o sinal adequado para cada carga, multiplicada pelo valor da carga elementar:

$$\rho = q \cdot (p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (2.8)$$

Nesta equação, a diferença entre considerações para operação em temperatura ambiente e baixas temperaturas torna-se aparente. A concentração de dopantes é

usualmente assumida como totalmente ionizada em temperatura ambiente o que, intuitivamente, não se mantém para análises em baixa temperatura. A forma de se escrever a ionização parcial está baseada nas equações [14]:

$$N_D^+ = N_D / [1 + 2 \cdot e^{(E_{fn} - E_D)/k \cdot T}] \quad (2.9)$$

$$N_A^- = N_A / [1 + 4 \cdot e^{(E_A - E_{fp})/k \cdot T}] \quad (2.10)$$

Os níveis de Fermi E_{fn} e E_{fp} são apropriadamente relacionados às variáveis dependentes através das relações:

$$(E_{fn} - E_D)/k \cdot T = G_{1/2}(n/N_C) + (E_C - E_D)/k \cdot T \quad (2.11)$$

$$(E_A - E_{fp})/k \cdot T = G_{1/2}(p/N_V) + (E_A - E_V)/k \cdot T \quad (2.12)$$

onde a função $G_{1/2}$ é a função inversa de Fermi de ordem 1/2 e definida como:

$$G_{1/2} [2/\sqrt{\pi} \int \sqrt{y}/(1 + e^{y-x}) \cdot dy] = x \quad (2.13)$$

Modelagem da Mobilidade dos Portadores

A mobilidade dos portadores é uma função complexa de diferentes mecanismos de espalhamento. Podem-se citar, por exemplo, os fenômenos de espalhamento envolvendo fônons, com defeitos na estrutura cristalina e com átomos de impurezas ionizados. Estes fenômenos estão relacionados com a concentração de impurezas no semicondutor e com a temperatura em que o mesmo se encontra.

À medida em que os campos elétricos aumentam de intensidade com a redução geométrica dos dispositivos, a probabilidade de interação dos portadores com a rede cristalina aumenta, e as suas velocidades de deriva tendem a se saturar em valores que podem atingir 10^7 cm.s⁻¹ para dispositivos de silício.

Decorrente destes aspectos físicos que assumem um caráter muito complexo, não se encontra uma expressão fundamentada em uma base puramente teórica para a mobilidade. Têm-se, contudo, expressões que incluem parâmetros empíricos, que devem ser mantidos em pequeno número e serem de fácil extração [4],[17],[18].

Uma fórmula simples para a mobilidade é dada por [4],[13]:

$$\mu(N, n, p) = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + (N_T/N_{\text{ref}})^{\alpha_1}} \quad (2.14)$$

As Tabs. I e II, que são apresentadas a seguir, ilustram valores típicos para os parâmetros que são utilizados na Eq. (2.14).

	μ_{\max} ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	μ_{\min} ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
elétrons	1360	92
lacunas	495	47,7

Tabela I - Valores Típicos para μ_{\max} e μ_{\min} (T=300K)

	N_{ref} (cm^{-3})	α_1
elétrons	$1,3 \cdot 10^{17}$	0,91
lacunas	$1,9 \cdot 10^{17}$	0,76

Tabela II - Valores Típicos para N_{ref} e α_1 (T=300K)

Relacionando-se a mobilidade com o campo elétrico tem-se [4],[13]:

$$\mu(N, n, p, E) = \mu(N, n, p) \cdot \frac{1}{\{ 1 + [\mu(N, n, p) \cdot \dot{E} / V_{\text{sat}}]^{\beta_1} \}^{-1/\beta_1}} \quad (2.15)$$

A Tab. III resume os valores típicos para os parâmetros utilizados na Eq. (2.15) [13].

	$v_{\text{sat}} (S_i)$ (cm.s ⁻¹)	β_1
elétrons	10^7	1,18
lacunas	$8 \cdot 10^6$	1,21

Tabela III - Valores Típicos para v_{sat} e β_1 (T=300K)

Principalmente com os dispositivos MOS, os efeitos da rugosidade na interface S_i - S_iO_2 constituem uma grande causa de espalhamento quando em altas concentrações de portadores [4],[16]. Este efeito é levado em conta dividindo-se o campo elétrico em componentes que são longitudinais (E_{\parallel}) e transversais (E_{\perp}) à densidade de corrente [4], ou seja:

$$\mu(N, E_{\parallel}, E_{\perp}) = \mu(N, E_{\parallel}) \cdot (1 + \alpha_E \cdot E_{\perp})^{-1/2} \quad (2.16)$$

onde α_E é um parâmetro de redução da mobilidade com o aumento do campo transversal e assume os valores:

$$\alpha_E(\text{elétrons}) = 1,54 \cdot 10^{-5} \text{ (cm.V}^{-1}\text{)};$$

$$\alpha_E(\text{lacunas}) = 5,35 \cdot 10^{-5} \text{ (cm.V}^{-1}\text{)}.$$

Outras aproximações são possíveis para a mobilidade e algumas expressões que incluem dopagem, densidade de portadores, campos longitudinal e transversal e distância da interface entre o silício e o dióxido de silício alcançam bons resultados em soluções numéricas [4].

Modelagem da Geração e Recombinação de Portadores

Para o silício, o termo R nas Eqs(2.2) e (2.3) representa o mecanismo de geração e recombinação de elétrons e lacunas. É composto pela soma da Recombinação de Shockley-Read-Hall (R_{SH}), da recombinação de Auger (R_{AU}) e da geração causada por ionização de impacto (R_{II}) [4],[13],ou seja:

$$R = R_{SH} + R_{AU} + R_{II} \quad (2.17)$$

Onde:

$$R_{SH} = \frac{p \cdot n - n_i^2}{\tau_p(n + n_i) + \tau_n(p + n_i)} \quad (2.18)$$

$$R_{AU} = (c_p \cdot p + c_n \cdot n) \cdot (p \cdot n - n_i^2) \quad (2.19)$$

$$R_{II} = \alpha_n |J_n|^3 / q + \alpha_p |J_p|^3 / q \quad (2.20)$$

As taxas de ionização para elétrons e lacunas são da forma:

$$\alpha_{n,p} = \alpha_{n,p}^{\infty} \cdot e^{(-b/E)} \quad (2.21)$$

A Tab IV ilustra valores típicos dos parâmetros da Eq. (2.21).

	α^{∞} (cm^{-1})	b ($\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$)	C ($\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$)
elétrons	$7,05 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^{-32}$
lacunas	$1,582 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^6$	10^{-31}

Tabela IV - Valores Típicos para $C_{n,p}$, α^{∞} e b (T=300K)

CAPÍTULO III

MODELOS DIMENSIONAIS PARA O MOSFET

Considere-se a Fig.1 onde está reproduzida a estrutura básica e idealizada de um MOSFET de fortalecimento canal n.

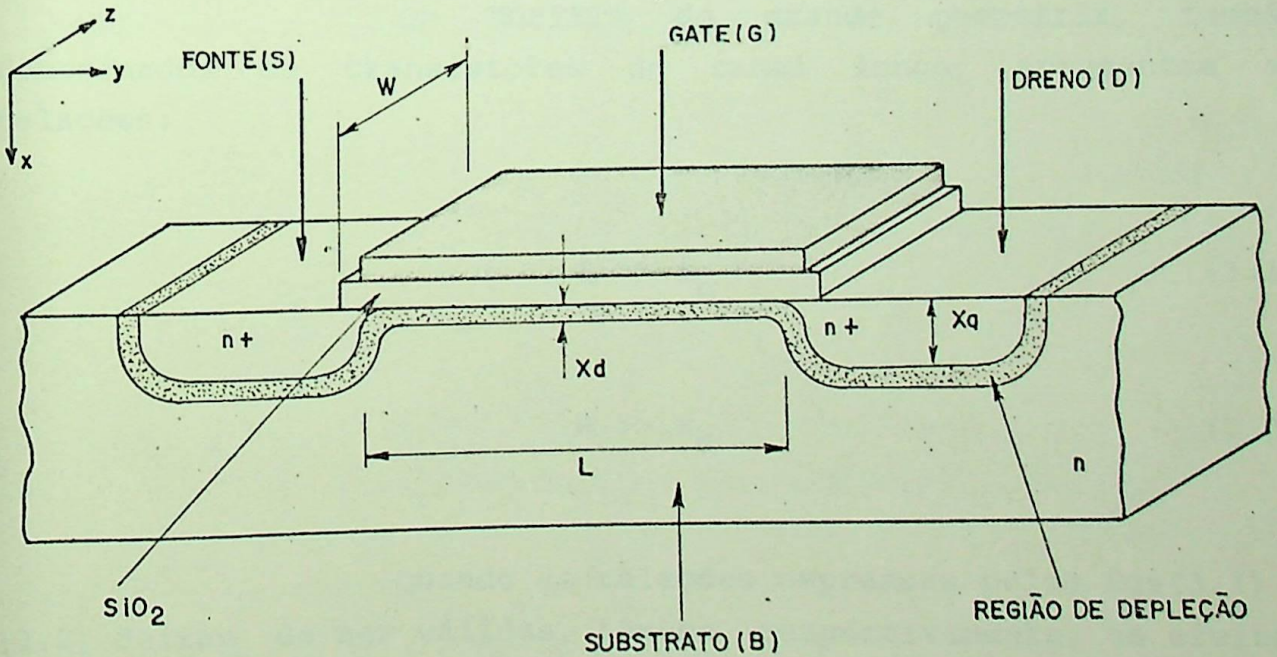


Fig.1 - Aspectos Construtivos Idealizados do Transistor MOSFET

A região delimitada pelas dimensões L e W é denominada região de canal (ou simplesmente canal) e se constitui na área de maior interesse do ponto de vista da operação do dispositivo. Nesta região será formada a camada de inversão que propiciará o fluxo de portadores entre a Fonte e o Dreno.

Este fluxo será regido pelas distribuições de campos, de potenciais e de cargas, e a geometria do dispositivo terá uma forte influência na análise e equacionamento de grandezas relacionadas como, por exemplo, a mobilidade dos portadores e a tensão de limiar do dispositivo.

O fator que caracteriza o dispositivo no sentido de lhe atribuir a condição de ser um transistor de grande geometria ou de pequena geometria diz respeito ao comprimento (L) e a largura (W) do canal quando comparados com as profundidades das difusões (x_q) das regiões do Dreno e da Fonte e a profundidade da região de depleção (x_d).

Os MOSFETs de grande geometria, também denominados de transistores de canal longo, apresentam as relações:

$$L \gg x_q \quad (3.1)$$

$$W \gg x_d \quad (3.2)$$

Quando as relações expressas pelas Eqs(3.1) e (3.2) deixam de ser válidas, têm-se, respectivamente, os efeitos de canal curto e canal estreito. Os MOSFETs que incluem estes dois efeitos são denominados de transistores de pequena geometria.

Outro fator que tem participação nos efeitos decorrentes da pequena geometria é o da espessura do óxido (t_{ox}) que faz o isolamento entre o eletrodo de controle e a região do canal.

3.1 Modelo Uni-Dimensional

No MOSFET de canal longo ($L > 5\mu\text{m}$ [24]), as modelagens mais utilizadas são a aproximação de canal gradual e o modelo "charge sheet".

A idéia fundamental da aproximação de canal gradual é a de que a intensidade das linhas de campo elétrico normais à camada de inversão (direção x) é substancialmente maior que a intensidade das linhas de campo elétrico longitudinais (direção y). Colocando-se de outra forma, pode-se dizer que o potencial elétrico varia levemente ao longo do canal [19],[20].

O modelo "charge sheet" é baseado na compressão da camada de inversão em uma camada de espessura infinitesimal, com os detalhes da distribuição real de cargas na direção normal a esta camada desprezados [21].

Estas modelagens utilizam modelos físicos macroscópicos, como o "drift diffusion" discutido no Cap. II, e as simplificações e aproximações decorrentes das considerações geométricas conduzem a um conjunto de equações que permitem uma solução de forma analítica.

Esta modelagem é denominada genericamente de uni-dimensional e se mostra bastante atraente quanto aos aspectos

gerais e práticos, sendo utilizada sobretudo em programas de análise de circuitos devido ao seu pequeno consumo de recursos computacionais [20].

3.2 Modelos Bi e Tri-Dimensionais

A miniaturização imposta pelo progresso dos processos de litografia tem resultado em estruturas MOS que são cada vez mais sensíveis aos parâmetros geométricos. Dispositivos que podem ser modelados uni-dimensionalmente estão se tornando a exceção em lugar de regra [22].

As equações derivadas na modelagem uni-dimensional são baseadas em considerações que falham na tentativa de descrever adequadamente os dispositivos onde estão presentes os efeitos de canal curto e/ou canal estreito, implicando em um baixo nível de precisão [19].

Para se adequarem os resultados obtidos da modelagem uni-dimensional com os resultados experimentais, ou mesmo com os resultados obtidos por modelos de dimensão superior, torna-se necessário, a introdução de parâmetros de ajuste [20].

Se o canal é curto, uma parte significativa das linhas de campo elétrico terá componentes tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal. Portanto, será necessária uma análise bi-dimensional.

Se o canal é estreito, novamente uma parte significativa das linhas de campo elétrico terá componentes ao longo das direções transversal e no sentido da direção z .

Necessita-se aqui também de uma análise bi-dimensional.

Quando o transistor MOS apresenta uma geometria tal que o canal é curto e estreito, as linhas de campo elétrico terão componentes significativas nas três direções. Será necessária uma análise tri-dimensional [19].

Em contraste com a modelagem Uni-Dimensional, a modelagem de ordem superior utiliza modelos mais realistas do comportamento dos dispositivos, incorporando propriedades não lineares de transporte, ou chegando mesmo a substituir o modelo clássico por outros modelos que levem em consideração a teoria quântica de transporte (modelos microscópicos) [23].

3.3 Efeitos da Geometria

Embora a redução geométrica dos transistores MOS apresente um conjunto de efeitos simultâneos e inter-relacionados que distanciam as características elétricas das idealizadas na modelagem uni-dimensional, estes efeitos podem ser avaliados independentemente por uma questão de simplicidade.

Modulação do Comprimento do Canal

Quando o MOSFET está operando na região de saturação, ou seja, a tensão V_{DS} é maior que $(V_{GS} - V_T)$, verificam-se que as curvas características $I_D \times V_{DS}$ não são exatamente paralelas ao eixo horizontal, mas exibem uma inclinação positiva.

Esta inclinação é mais pronunciada em dispositivos que apresentam canal curto e, historicamente, foi o primeiro efeito de canal curto a ser estudado.

O efeito em questão é o resultado de uma complexa interação bi-dimensional entre as linhas de campo elétrico presentes na vizinhança da região do dreno. Resumidamente, porém, pode-se dizer que ao se aumentar a tensão V_{DS} , a região de depleção relativa ao dreno aproxima-se para mais perto da região da fonte e, efetivamente, diminui-se o comprimento do canal. Isto causa um aumento no ganho do transistor e um conseqüente aumento na corrente de dreno (I_D) [19],[24].

Saturação da Velocidade

Ao se fazer a transição da região de operação linear para a região de saturação com o aumento da tensão V_{DS} , a velocidade de deriva dos portadores eventualmente se satura quando um valor crítico da componente longitudinal do campo é atingido.

Em dispositivos de canal curto, este campo crítico é alcançado para pequenas distâncias da fonte. Isto se traduz em uma influência nas características $I_D \times V_{DS}$ de forma que, para uma mesma tensão V_{GS} , a condição de operação na região de saturação seja iniciada para menores valores de V_{DS} [19],[24].

Degradação da Mobilidade

Outro efeito causado pelas linhas de campo elétrico diz respeito a suas influências na mobilidade dos portadores. A maior intensidade destas linhas, em face da redução das dimensões dos transistores, provoca fenômenos mais acentuados de espalhamento dos portadores, que se traduzem diretamente em uma redução de suas mobilidades.

Esta redução de mobilidade diminui de forma significativa o ganho do transistor MOS, tanto na região de operação linear quanto na região de operação em saturação.

Os efeitos são uma função da espessura do óxido isolante e do comprimento do canal, o que representa uma influência das componentes longitudinal e transversal do campo elétrico. Dentre estas, as segundas terão um impacto mais drástico nas características do dispositivo [19],[24].

Portadores Quentes: Elétrons Quentes ("Hot Electrons") e Lacunas Quentes ("Hot Holes")

A maior intensidade das linhas de campo em dispositivos de pequena geometria também causa o aparecimento de portadores providos de alta energia, denominados de portadores quentes ("hot electrons" e "hot holes").

Existe uma probabilidade de que estes portadores de alta energia presentes na região do canal sejam injetados no óxido isolante, capturados e aprisionados. Aparecerão como cargas acumuladas no óxido e tenderão a

aumentar gradativamente com o decorrer do tempo.

Estas cargas degradam o desempenho do dispositivo, notadamente aumentando a sua tensão de limiar e, conseqüentemente, diminuindo o controle deste eletrodo sobre a corrente de dreno.

Do exposto, para determinadas condições de polarização, o transistor MOS pode apresentar um tempo de vida limitado após o qual a sua aplicabilidade seria inaceitável [19].

Deslocamento da Tensão de Limiar

Os efeitos de canal curto e de canal estreito influem de forma contrária na tensão de limiar do MOSFET. Enquanto que em dispositivos de canal curto há uma diminuição da tensão V_T , nos dispositivos de canal estreito verifica-se um aumento desta tensão.

Considerem-se primeiro os dispositivos de canal curto. Quando a dimensão L diminui, tanto o dreno quanto a fonte estão mais próximos de todos os pontos do canal, de forma que o campo elétrico originado pela tensão V_{DS} terá componentes significativas também na direção transversal. Isto faz com que dreno e fonte desempenhem um pouco do papel do eletrodo de controle em adição às suas funções normais.

Assim, trazer as regiões de dreno e fonte para as proximidades dos pontos do canal equivale a fortalecer a influência do "gate", ou seja, um aumento na tensão V_{DS} também contribui para um aumento no enriquecimento da camada de inversão. Este fenômeno é modelado estabelecendo-se uma tensão

efetiva de limiar V_{Tef} .

Na Fig. 2, ilustra-se uma visão mais real da estrutura de um MOSFET.

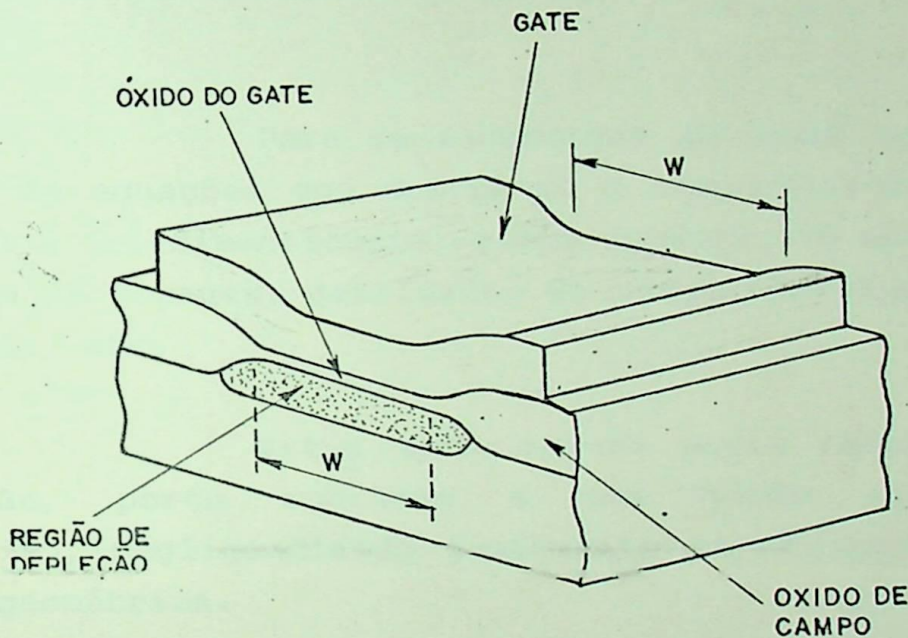


Fig.2 - Aspectos Construtivos Reais do Transistor MOSFET

Observa-se que o óxido isolante torna-se gradativamente menos espesso na região do canal e que a região de depleção não está limitada à área diretamente abaixo do óxido do gate devido à distribuição das linhas de campo elétrico.

Se a dimensão W é pequena, canal estreito, a quantidade de cargas abaixo do óxido de campo torna-se significativa com relação a quantidade total de cargas da região de depleção.

Em contraste com o canal curto, o eletrodo de controle precisará agora de um maior valor de tensão de limiar para depletar a quantidade de cargas necessárias antes da formação da camada de inversão. Também aqui este fenômeno será modelado através de uma tensão efetiva de limiar [19].

3.4 Aspectos das Soluções Numéricas

Para se alcançarem soluções analíticas de um conjunto de equações que descrevam o comportamento do MOSFET em termos bi e tri-dimensionais, serão necessárias aproximações para os perfis de dopagem, densidades de cargas espaciais, modelos de mobilidade, etc.

Estas aproximações podem reduzir o tempo de computação, porém conduzem a uma visão simplificada do dispositivo, negligenciando justamente os efeitos causados pela redução geométrica.

Normalmente estas soluções analíticas aproximadas requerem a introdução de parâmetros adicionais para ajustar os resultados obtidos aos levantamentos experimentais ou mesmo aos resultados oriundos de técnicas mais precisas [4],[20].

Pode-se contornar este problema, se as equações do dispositivo forem tratadas com técnicas numéricas onde considera-se o conjunto completo de equações sem simplificações. Tal procedimento leva, naturalmente, a um maior consumo de recursos computacionais [4].

As soluções numéricas utilizam fundamentalmente o tratamento das equações para um conjunto

discreto de pontos. Primeiramente, o espaço domínio sobre o qual é definido o sistema é mapeado com uma grade de pontos ou nós distintos. Em seguida, aplica-se um método para tornar as equações discretas com o objetivo de se obter uma condição algébrica do problema válida neste domínio finito. Finalmente, as equações são resolvidas para as variáveis não conhecidas [4],[18].

Seguindo este procedimento generalizado, existe uma grande variedade de possibilidades para se alcançar a condição de equações discretas. Os métodos mais comuns são os das diferenças finitas e o dos elementos finitos [4].

A confiabilidade da modelagem que utiliza estes métodos numéricos exatos depende basicamente de dois aspectos: os erros nos processos de transformação das equações em equações discretas e os erros de truncamento.

Os erros na transformação das equações dependem fortemente da escolha da quantidade de pontos da grade. Este erro pode ser minimizado o tanto quanto necessário. Entretanto, um número muito elevado de pontos seria requerido, e os custos computacionais se elevariam demasiadamente.

Os erros de truncamento são originados pelo "hardware" do computador no qual está se processando a simulação do método. Geralmente, máquinas de 32 bits são suficientes, mas, em alguns casos, são necessárias máquinas de 64 bits ou a utilização de palavras de dupla precisão.

CAPÍTULO IV

REVISÃO DOS MODELOS

4.1 Introdução

A modelagem de transistores MOS tem sido objeto de muitos trabalhos de pesquisa ao longo dos últimos anos. O crescente e contínuo aprimoramento dos aspectos relativos a modelagem está fundamentado, segundo diversos autores, em três fatos relevantes:

(i) Miniaturização

Tomando por base a Fig. 3, observa-se que o crescente aumento no número de componentes por pastilha, desde a invenção do Circuito Integrado em 1959, já ultrapassou a várias ordens de grandeza [27].

Este aumento na densidade de integração só

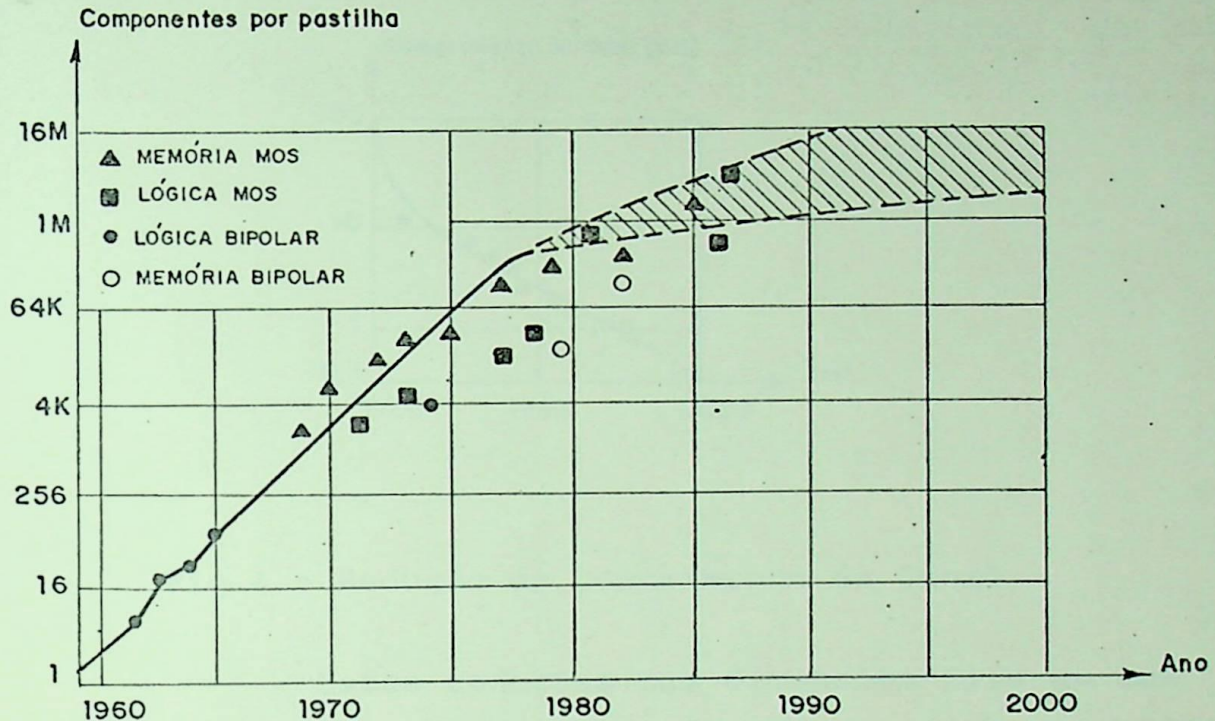


Fig.3 - Evolução da Densidade de Componentes por Pastilha

pode ser alcançado reduzindo-se as dimensões dos elementos básicos que compõem a pastilha: transistores, contatos, interconexões, etc.

Os progressos obtidos nos processos de litografia tiveram importância decisiva na redução das dimensões dos transistores MOS. O comprimento de canal, que se situava na ordem de dezenas de micra no início da década de sessenta, foi reduzido para unidades ou mesmo décimos de micron na década de oitenta (em [28] relata-se um veículo de teste que apresenta MOSFETs com $0,1 \mu\text{m}$ de comprimento de canal).

A Fig.4 ilustra esta redução do comprimento de canal avaliada sobre o mesmo período de tempo coberto pela Fig.3 [27].

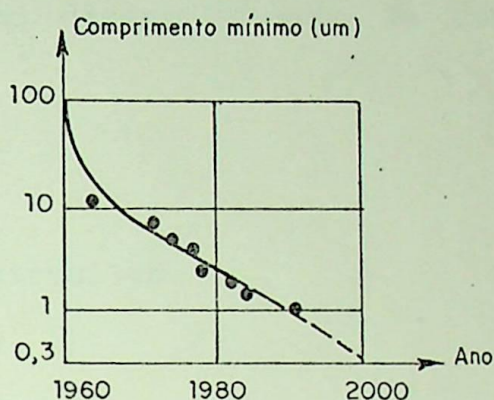


Fig.4 - Redução do Comprimento do Canal

Estas reduções nas dimensões fizeram com que os MOSFETs ficassem fortemente dependentes de parâmetros geométricos, levando-se a novas propostas de modelagem [22],[26],[27].

(ii) Formalismo Físico

Como uma consequência direta da miniaturização, surgiram questionamentos sobre a validade das bases físicas que incorporavam os modelos existentes.

Verificou-se, por exemplo, a obrigatoriedade da inclusão de uma série de efeitos de segunda ordem. Como consequência, surgiram novas linhas de modelagem fundamentadas em equações mais completas e complexas (modelos microscópicos).

Tal procedimento fez com que se

considerassem os recursos computacionais como ferramentas cruciais e indispensáveis, tanto na análise dos dispositivos existentes quanto no desenvolvimento de futuros sistemas ULSI [10],[22],[29].

(iii) Simulação de circuitos

Paradoxalmente, enquanto condições mais complexas são impostas pela miniaturização e pelo formalismo físico, por outro lado os projetistas de CIs necessitam de modelos que sejam simples e precisos o suficiente para a implementação de simuladores de circuitos para os transistores MOS.

Nestas simulações, é fundamental uma rápida avaliação das características do transistor, o que motivou o aparecimento de uma nova abordagem a partir da existência de modelos analíticos ou pseudoanalíticos que preservem a física do dispositivo o tanto quanto possível, permitindo a análise da sensibilidade a parâmetros, variações nas condições de processo e possibilitando a extrapolação para tecnologias de nova geração [30],[31].

4.2 Síntese do conhecimento

Com base no que foi discutido na introdução deste Capítulo, optou-se por descrever a síntese das atividades em modelagem, dividindo-as em dois grupos.

No primeiro grupo, denominado de **Modelagem Analítica**, agrupam-se as contribuições cujo objetivo é a obtenção de modelos mais simples para os transistores MOS, visando à aplicação em softwares de simulação de circuitos e dispositivos.

No segundo grupo, denominado de **Modelagem Numérica**, procuram-se agrupar as contribuições que buscam um detalhamento físico mais rigoroso e completo para os MOSFETs e, conseqüentemente, exigem técnicas numéricas mais sofisticadas.

Modelagem Analítica

O desenvolvimento dos primeiros transistores MOS, estáveis, levou muitos pesquisadores a iniciarem estudos em busca da compreensão dos mecanismos que regem o transporte de portadores de carga nas finas camadas de inversão em superfícies de silício [32].

Por exemplo, uma das primeiras investigações sobre a operação do MOSFET foi proposta por Ihantola e Moll que atribuíram a condução elétrica entre fonte e dreno a um mecanismo similar àqueles propostos por Shockley em sua teoria do transistor unipolar [34].

Basicamente, estas primeiras modelagens eram fundamentadas em dispositivos que hoje são considerados de canal longo, porém, à medida em que a tecnologia de circuitos integrados avança na produção de dispositivos com escalas bastante reduzidas, maiores são os requisitos de uma base teórica mais rigorosa.

Como conseqüência desta necessidade de um

formalismo mais rigoroso na descrição do comportamento elétrico dos transistores MOS, observa-se que uma grande quantidade de pesquisadores tem se dedicado a proposição de novos modelos mais completos e que incluam efeitos de ordem superior.

A modelagem analítica, pela sua tentativa de propiciar modelos relativamente simples para aplicações voltadas principalmente a simulação de circuitos, não foge à regra e também se apresenta extensivamente pesquisada.

Ghibaudo em [38] observa que "embora a formulação analítica não esteja apta para competir com modelos numéricos mais rigorosos, as descrições das características do dispositivo feitas por equações analíticas mais simples, permitem uma melhor compreensão da operação do MOSFET. Além disso, fornecem uma proveitosa ferramenta para modelagem de circuitos analógicos e projetos de circuitos integrados"

Modelos Analíticos de MOSFETs de Canal Longo

Frequentemente apresentado na literatura especializada, o modelo de Pao e Sah [35] é aceito como uma das modelagens mais rigorosas e precisas do MOSFET de canal longo [4],[21],[33].

A hipótese fundamental do modelo é a aproximação de canal gradual o que torna possível o desenvolvimento de uma análise uni-dimensional na formulação das relações para a tensão de limiar (V_T) e para a corrente de dreno (I_D) [6].

Pao e Sah partiram das equações clássicas dos

semicondutores (o que justifica a qualidade de um tratamento rigoroso [6] para o modelo) resolvendo uni-dimensionalmente a equação de Poisson, juntamente com uma equação de continuidade de corrente para os elétrons (foi assumido um transistor MOS de canal n).

Além disso, consideraram as componentes de deriva e de difusão da corrente melhorando bastante o modelo para o regime de operação em que a saturação é alcançada.

No seu trabalho, estabeleceram as relações mostradas abaixo, válidas para todas as regiões de operação do MOSFET de canal longo, em excelente concordância com dados levantados experimentalmente [35]:

$$I_D = (K.T/q)^2 \cdot (C_{OX} \cdot W/2 \cdot L) \cdot \gamma \cdot \mu_n \cdot \int_0^{U_D} \int_{U_F}^{U_S} \frac{e^{(U - \xi - U_F)}}{F(U, \xi, U_F)} dU d\xi \quad (4.1)$$

$$U'_G = U_S + \gamma \cdot F(U, \xi, U_F) \quad (4.2)$$

onde:

$$\gamma = U_S / |U_S| \cdot (C_D / C_{OX}) \quad (4.3)$$

$$C_D = K_S \cdot \epsilon_0 / L_D \quad (4.4)$$

Entretanto, a natureza da integral da Eq. (4.1) implica um tempo excessivo de computação para a sua

avaliação, fazendo com que o modelo se torne pouco compensador para aplicações práticas [23].

Para se reduzir a complexidade e o tempo de computação, dois métodos de simplificação têm sido sugeridos [21],[33]:

(i) aproximações matemáticas, cujo intuito é o de se reduzir a integral dupla a uma integral simples ou mesmo a uma fórmula analítica;

(ii) aproximação "charge sheet", proposta por Brews [117] que considera uma alternativa simplificada para a solução da equação de Poisson e cujos resultados encontram uma boa concordância com o modelo de Pao e Sah.

As equações simplificadas que representam o comportamento do MOSFET de canal longo estão perfeitamente estabelecidas e são frequentemente citadas como as equações para um dispositivo MOS "ideal" [24],[36]:

$$I_D(\text{linear}) = \mu_o \cdot C_{ox} \cdot (W/L) \cdot V_{DS} \cdot [(V_{GS} - V_T) - V_{DS}/2] \quad (4.5)$$

$$I_D(\text{saturação}) = \mu_o \cdot C_{ox} \cdot (W/2 \cdot L) \cdot (V_{GS} - V_T)^2 \quad (4.6)$$

$$V_T = V_{to} + (t_{ox}/\epsilon_{ox}) \cdot \sqrt{2 \cdot q \cdot \epsilon_{si} \cdot N_A} \cdot [\sqrt{V_{SB} + 2 \cdot \phi_f} - \sqrt{2 \cdot \phi_f}] \quad (4.7)$$

onde:

$$\phi_f = (K.T/q) \cdot L_n (N_A/n_i) \quad (4.8)$$

Modelos Analíticos de MOSFETS de Canal Curto e/ou Estreito

Embora as Eqs. (4.5) a (4.7) descrevam com precisão um dispositivo MOS "idealizado", não podem ser utilizadas em transistores que apresentem efeitos relativos a diminuição de suas dimensões.

A situação acima se justifica pelo fato de que dispositivos com escalas submicrométricas têm um comportamento intrinsecamente bi ou tri-dimensional.

Neste ponto, temos as atividades da modelagem analítica divididas em duas direções.

Há publicações que procuram manter a formulação básica proposta pela modelagem uni-dimensional, porém acrescentando parâmetros de ajuste que modelem um ou mais de um efeito decorrente da pequena geometria. Este procedimento é uma tentativa de se alcançar uma maior precisão dos resultados comparativamente aos dados levantados experimentalmente ou mesmo aos dados oriundos de simulações mais rigorosas.

Outras publicações, contudo, procuram aproximações diretas das equações dos semicondutores e podem ser consideradas como formulações "verdadeiramente" bi ou tri-dimensionais.

Analisa-se, inicialmente, os modelos analíticos que incluem os parâmetros de ajuste nas equações fundamentais do modelo uni-dimensional.

(i) Modelagem para a Influência da Geometria na Velocidade e Mobilidade dos Portadores.

Uma das principais razões para a diferença verificada entre as características elétricas de um transistor MOS de canal curto e as resultantes das formulações uni-dimensionais é a dependência da velocidade de deriva dos portadores com o campo elétrico longitudinal E_y [29],[37].

Para dispositivos de canal longo pode-se escrever [37]:

$$v = \mu_{\text{eff}} \cdot E_y \quad (4.9)$$

onde a mobilidade efetiva dos portadores (μ_{eff}) é assumida como sendo constante e igual a μ_0 .

Contudo, em dispositivos de canal curto, a mobilidade efetiva não se mantém constante e é uma função do campo elétrico transversal (E_t) na região da camada de inversão.

A velocidade dos portadores deixará de ser proporcional ao campo longitudinal, tendendo a saturar-se.

Jeng et al em [29], Toh et al em [37] e Sodini et al [39] estabelecem para a velocidade dos portadores as relações:

$$v = \mu_{\text{eff}} \cdot (1 + E_y/E_C)^{-1} \quad \text{para } E_y \leq E_C \quad (4.10)$$

$$v = v_{\text{sat}} \quad \text{para } E_y \geq E_C \quad (4.11)$$

que constituem hipóteses muito utilizadas em modelagem e que levam à definição do campo elétrico crítico E_C :

$$E_C \equiv 2 \cdot v_{\text{sat}} / \mu_{\text{eff}} \quad (4.12)$$

A degradação da mobilidade em função do campo elétrico transversal, que faz com que μ_{eff} seja inferior a μ_0 , encontra, nos trabalhos de diversos autores uma tentativa de se alcançar uma base teórica bastante consistente para descrever os mecanismos envolvidos [40],[41].

Segundo Ohno [54], um dos principais fatores que se atribuem a esta extensiva pesquisa da mobilidade reside na sua conveniência como um veículo de investigação para a física de gases eletrônicos em duas dimensões.

Entretanto, modelos empíricos para a degradação da mobilidade apresentam-se de forma mais simplificada e obtém-se com isto um maior sucesso dentro da modelagem analítica [41].

A formulação empírica mais largamente utilizada para este efeito de degradação é citada em vários trabalhos como, por exemplo, em Engl et al [4], Jeng et al [29], Ghibaudo [38] e [42], Sodini et al [39], Wrigth [43], Lauwers e Meyer [44], Grotjohn e Hoefflinger [45], Massuda [47], Djenfelt [49] e Sheu [10]. Em todos estes trabalhos, tem-se a presença da relação:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_o \cdot (1 + Q_i/Q_c)^{-1} \quad (4.13)$$

A grandeza Q_c representa a carga crítica onde a mobilidade efetiva começa a decrescer de valor e vale aproximadamente de 1 a $2 \cdot 10^{13} \text{ q.cm}^{-2}$ [38],[42].

Q_i , a carga de inversão da Eq (4.13), pode ser escrita como:

$$Q_i = C_{\text{ox}} \cdot (V_{\text{GS}} - V_{\text{T}}) \quad \text{para } V_{\text{GS}} > V_{\text{T}} \quad (4.14)$$

Combinando-se as Eqs. (4.13) e (4.14) tem-se a relação da mobilidade efetiva, que é frequentemente utilizada na modelagem analítica e foi originariamente proposta por Crawford [4]:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_o \cdot [1 + \theta(V_{\text{GS}} - V_{\text{T}})]^{-1} \quad (4.15)$$

onde

$$\theta = C_{\text{ox}}/Q_c = \epsilon_{\text{ox}}/(t_{\text{ox}} \cdot Q_c) \quad (4.16)$$

representa o fator de redução da mobilidade.

Existem ainda outros trabalhos que relacionam a mobilidade com o campo elétrico longitudinal. É o caso da proposta de Trofimenkoff, que utiliza a relação [4]:

$$\mu = \mu_0 (1 + E_Y/E_C)^{-1} \quad (4.17)$$

Caughey et al verificou a validade da Eq. (4.17) para as lacunas, porém os autores demonstraram que para os elétrons uma melhor aproximação seria [4]:

$$\mu = \mu_0 [1 + (E_Y/E_C)^2]^{-1/2} \quad (4.18)$$

Apesar de simples, as Eqs. (4.17) e (4.18), não encontram um uso muito frequente na simulação de circuitos, pois, devido à sua forma, requerem um número muito elevado de iterações no processamento aumentando o tempo do mesmo [51].

Em algumas publicações como Gharabagi e El Nokali [46], Miranda e El Nokali [8] e El Banna e El Nokali [50], os efeitos dos campos elétricos longitudinal e transversal são combinados em uma única expressão. Basicamente temos as formulações das Eqs. (4.15), (4.17) e (4.18):

$$\mu = \mu_0 \cdot [1 + \theta(V_{GS} - V_T)]^{-1} \cdot [1 + (E_Y/E_C)]^{-1} \quad (4.19)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot [1 + \theta(V_{GS} - V_T)]^{-1} \cdot [1 + (E_Y/E_C)^2]^{-1/2} \quad (4.20)$$

Encontram-se ainda, nos trabalhos de Satter [52], Jeon e Burk [17] e Lee et al [53], propostas para o estabelecimento de modelos para a mobilidade que sejam semi-empíricos e que procuram manter uma base física mais sólida.

Normalmente a mobilidade nestes modelos

encontra-se expressa através da regra de Matthiessen [53],[59]:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_C} + \frac{1}{\mu_{ph}} + \frac{1}{\mu_{sr}} \quad (4.20)$$

A Eq. (4.20) mostra que a mobilidade dos portadores no canal é a soma das influências dos três mecanismos dominantes de espalhamento que são:

- (i) μ_C - mobilidade limitada pelo espalhamento com átomos de impureza ionizados (espalhamento de Coulomb);
- (ii) μ_{ph} - mobilidade limitada pelo espalhamento envolvendo fônons;
- (iii) μ_{sr} - mobilidade limitada pelo espalhamento envolvendo a rugosidade da superfície de interface $S_i - SiO_2$.

Jeon e Burk [17] atribuem a estas limitações da mobilidade as seguintes expressões:

$$\mu_C = a_1^{-1} \cdot T \quad \text{para } 100K \leq T \leq 370K \quad (4.21)$$

$$\mu_C = a_1^{-1} \cdot T^{-1} \cdot E_{eff}^{\alpha_1} \quad \text{para } 77K \leq T < 100K \quad (4.22)$$

$$\mu_{ph} = a_2^{-1} \cdot T^{-n_1} \cdot E_{eff}^{-1/\gamma_1} \quad \text{para } 100K \leq T \leq 370K \quad (4.23)$$

$$\mu_{ph} = a_2^{-1} \cdot T^{-1} \cdot E_{eff}^{1/3} \quad \text{para } 77K \leq T < 100K \quad (4.24)$$

$$\mu_{sr} = a_3^{-1} \cdot E_{eff}^{-2} \quad (4.25)$$

onde:

$$E_{eff} = q \cdot [(1/2 \cdot N_S) + N_{depl}] / \epsilon_{si} \quad (4.26)$$

e a_1 , a_2 , a_3 , α_1 , n_1 e γ_1 são parâmetros de ajuste a serem extraídos.

Outras contribuições para a modelagem dos efeitos da mobilidade e da velocidade dos portadores podem ser encontradas nos trabalhos de Omar e Reggiani [78], van Dort et al [79], Hafez et al [80], Gildenblat e Huang [81], Lee et al [82], Rothwarf [83], Kang [84] e Hiroki et al [85].

(ii) Modelagem para a Influência da Geometria na Modulação do Comprimento do Canal

Para dispositivos de canal curto operando na região de saturação, não é possível assumir que o comprimento efetivo do canal seja muito maior que o comprimento da região depletada próxima ao dreno. Neste caso, a modulação do comprimento do canal torna-se muito importante e afeta principalmente a avaliação da resistência de saída do dispositivo [4],[29].

Diversos autores como El Nokali e Miranda [51], El Banna e El Nokali [50], Masuda et al [47], Gharabagi e El Nokali [46], Chatterjee et al [60] e Bose et al [55] colocam como uma formulação para a corrente de dreno na região de saturação a seguinte expressão:

$$I_D = I_{D(Sat)} \cdot L / (L - \Delta L) = I_{D(Sat)} \cdot (1 - \Delta L / L)^{-1} \quad (4.27)$$

Nesta equação, $I_{D(Sat)}$ representa o valor da corrente de dreno para a tensão V_{DS} onde começa a ocorrer a saturação e ΔL representa a diminuição do comprimento efetivo do canal.

Para se avaliar ΔL pode-se considerar, primeiramente, que não esteja ocorrendo a saturação da velocidade dos portadores e tem-se [19],[46],[55],[56]:

$$\Delta L = K + [K^2 + (2 \cdot \epsilon_s / q \cdot N_A) \cdot (V_{DS} - V_{DSat})]^{1/2} \quad (4.28)$$

onde:

$$K = \epsilon_s \cdot E_p / q \cdot N_A \quad (4.29)$$

e V_{DSat} é o valor de tensão onde se assume a ocorrência do pinçamento do canal. E_p será a intensidade do campo elétrico lateral neste ponto.

Se a velocidade de saturação dos portadores é considerada, a Eq. (4.28) assume a seguinte forma [56]:

$$\Delta L = K' + [K'^2 + (2 \cdot \epsilon_s / q \cdot N_A) (V_{DS} - V'_{DSat})]^{1/2} \quad (4.30)$$

onde:

$$K' = \epsilon_s \cdot v_m / q \cdot N_A \cdot \mu_s \quad (4.31)$$

e V'_{DSat} é a tensão no ponto do canal onde ocorre a saturação da velocidade. A intensidade do campo elétrico neste ponto é v_m / μ_s .

(iii) Modelagem para a Influência da Geometria na Tensão de Limiar

Basicamente, para um transistor de grande geometria, a tensão de limiar pode ser expressa por [26],[57]:

$$V_T = V_{FB} + 2 \cdot \phi_f + Q_B / C_{ox} \quad (4.32)$$

Onde a grandeza Q_B representa a carga devido aos átomos de impureza ionizados que formam a região de depleção relativa à região do canal e é expressa por:

$$Q_B = q \cdot N_A \cdot W \cdot L \cdot x_d \quad (4.33)$$

A modelagem analítica dos efeitos geométricos sobre a tensão de limiar está intimamente relacionada às aproximações que são atribuídas ao volume que contém a carga Q_B .

Uma das primeiras propostas para se modelar o volume de cargas Q_B foi a de Yau e Poon que assumiram uma aproximação trapezoidal para este volume, considerando um transistor de canal curto operando com baixas tensões de dreno [4],[26].

Taylor generalizou a aproximação de Yau ao não impor restrições aos possíveis valores que a tensão de dreno poderia assumir.

Posteriormente, os modelos sofreram extensões como, por exemplo, as de Dang com novas propostas para as definições dos contornos das interfaces das regiões de depleção [4].

Seja, como exemplo, a Fig. 5. Reproduz-se nesta a região de interesse do canal evidenciando a proposta de Taylor para uma aproximação trapezoidal da carga Q_B .

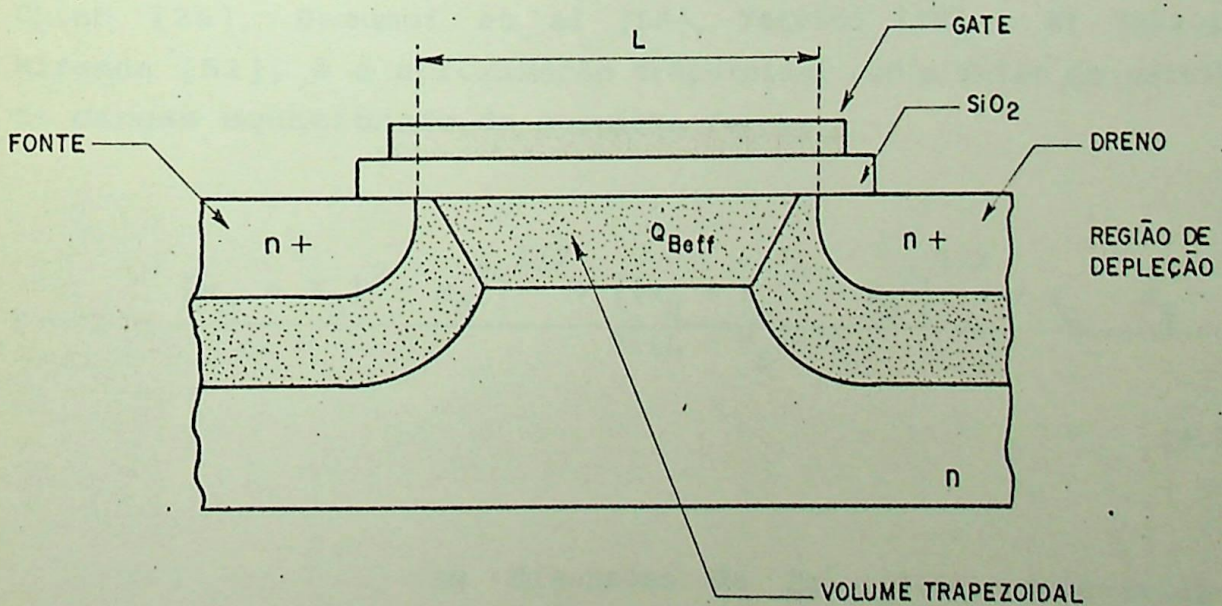


Fig. 5 - Aproximação de Volume Trapezoidal para Q_B

Verifica-se que na realidade existe uma quantidade de carga Q_{Beff} que se relaciona com Q_B através de um fator de partição de cargas F [26],[57],[58],[61],[86].

Em outras palavras, matematicamente a Eq. (4.32) deve ser escrita:

$$V_{\text{Teff}} = V_{\text{FB}} + 2 \cdot \phi_f + Q_{\text{Beff}}/C_{\text{ox}} \quad (4.34)$$

onde:

$$Q_{\text{Beff}} = F \cdot Q_B \quad (4.35)$$

O fator de partição de cargas pode assumir diferentes equacionamentos, dependendo da aproximação volumétrica adotada. Dentre estas, uma aproximação bastante usual na literatura, como se pode observar nos trabalhos de DeMassa e Chien [26], Benumof et al [56], Tsivids [19] e El Nokali e Miranda [51], é a aproximação trapezoidal com o fator de partição de cargas equacionado da seguinte forma:

$$F = 1 - \frac{[x_q + X_S]^2 - x_d^2]^{1/2} + [(x_q + X_D)^2 - x_d^2]^{1/2} - 2 \cdot x_q - Y_S - Y_D}{2 \cdot (L - Y_S - Y_D)} \quad (4.36)$$

As dimensões da Eq. (4.36) relacionam-se através das seguintes formulações:

$$x_d = [a \cdot (2 \cdot \phi_f + V_{BG})]^{1/2} \quad (4.37)$$

$$X_D = [a \cdot (V_{bi} + V_D + V_{BG})]^{1/2} \quad (4.38)$$

$$X_S = [a \cdot (V_{bi} + V_{BG})]^{1/2} \quad (4.39)$$

$$Y_D = [a \cdot (V_{bi} + V_D - 2 \cdot \phi_f)]^{1/2} \quad (4.40)$$

$$Y_S = [a \cdot (V_{bi} - 2 \cdot \phi_f)]^{1/2} \quad (4.41)$$

onde o parâmetro "a" é dado por :

$$a = (2 \cdot \epsilon_s) / (q \cdot N_A) \quad (4.42)$$

e V_{bi} representa a tensão embutida em uma junção PN sendo equacionada como:

$$V_{bi} = (K \cdot T / q) \cdot L_n (N_A \cdot N_D / n_i^2) \quad (4.43)$$

Quando o transistor apresenta canal estreito, tem-se uma contribuição adicional de cargas como uma consequência da maior penetração da região de depleção ao longo da largura do canal. A Fig. 6, a seguir, ilustra esta situação.

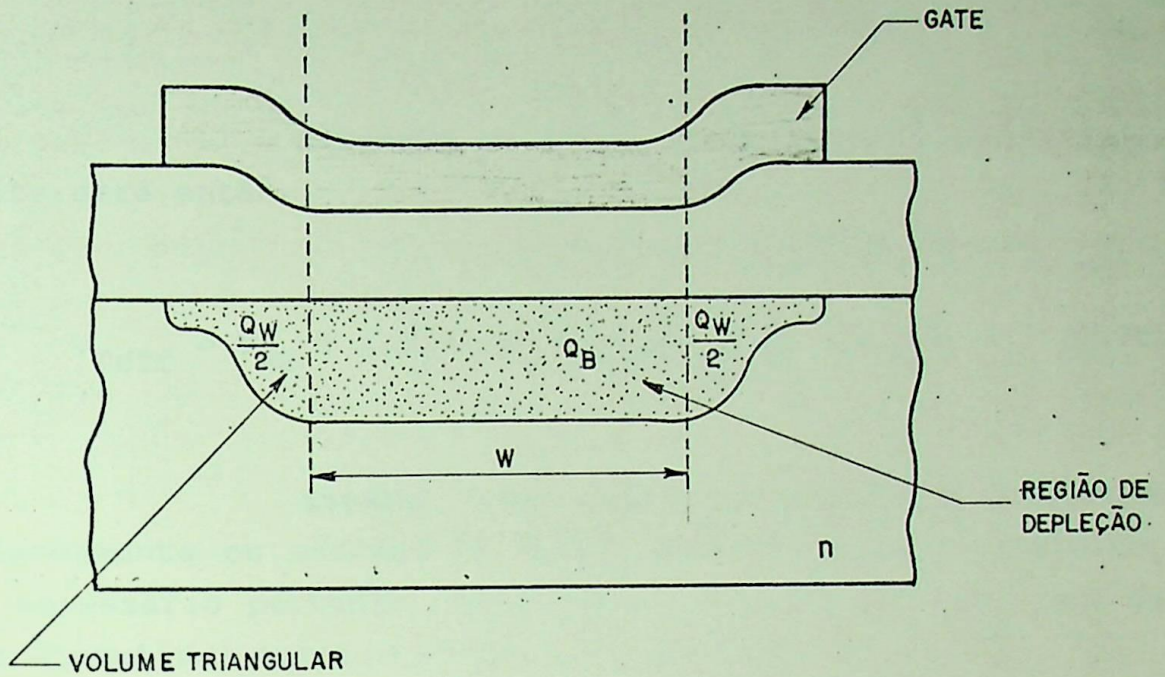


Fig.6 - Aproximação Volumétrica para MOS de Canal Estreito

Esta consideração de uma distribuição triangular das cargas sob o óxido de campo foi uma proposta sugerida por Ackers e Merckel e para esta aproximação a carga efetiva é equacionada [4],[26],[57], como:

$$Q_{Beff} = Q_B + Q_W \quad (4.44)$$

sendo:

$$Q_W = q \cdot N_A \cdot x_d \cdot L \cdot z_x \quad (4.45)$$

Na equação acima z_x representa o comprimento da penetração da região de depleção sob o óxido de campo e é dado por [26]:

$$z_x = \left[\frac{2 \cdot \epsilon_s \cdot (2\phi_f)}{q \cdot N_A} \right]^{1/2} \quad (4.46)$$

A tensão de limiar de um dispositivo de canal estreito será então:

$$V_{Teff} = V_{FB} + 2 \cdot \phi_f + (q \cdot N_A \cdot x_d / C_{OX}) \cdot (1 + z_x / W) \quad (4.47)$$

Existem transistores em que estão presentes simultaneamente os efeitos de canal curto e de canal estreito, sendo necessário portanto, considerar todas as contribuições de cargas discutidas anteriormente.

Um exemplo, citado por DeMassa e Chien [26], soma os volumes trapezoidal e triangular originando a estrutura mostrada na Fig. 7.

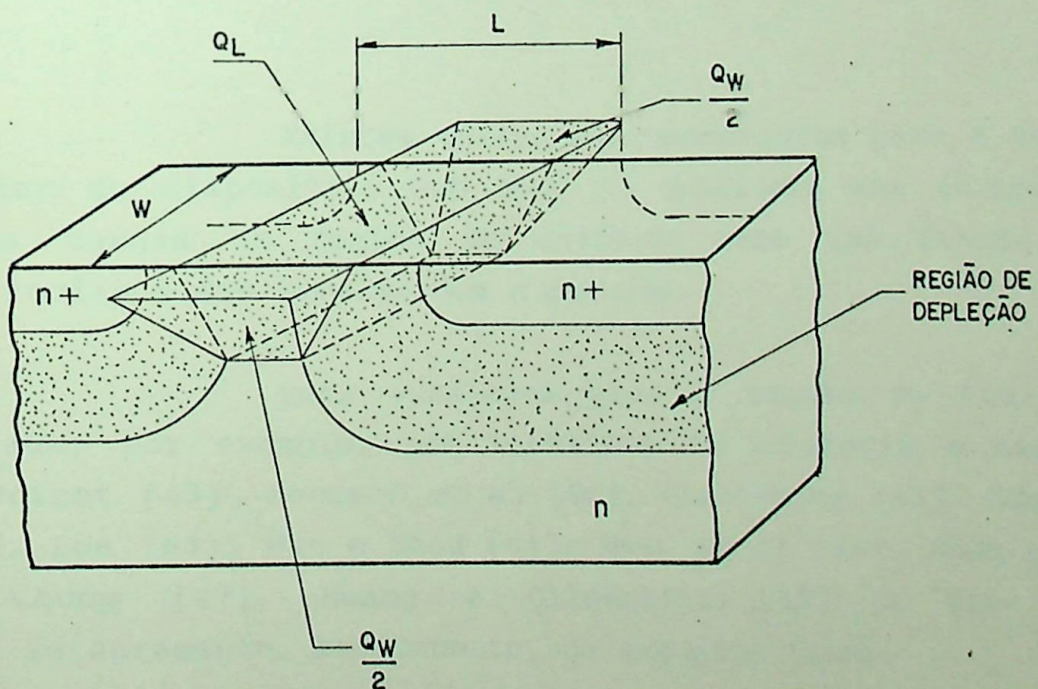


Fig. 7 - Aproximação Volumétrica para MOS de Pequena Geometria

Para este transistor de pequena geometria a carga Q_B é equacionada como:

$$Q_B = Q_L + Q_W \quad (4.48)$$

e considerando-se os aspectos geométricos destes volumes, tem-se a seguinte formulação para a tensão de limiar:

$$V_{Teff} = V_{FB} + 2 \cdot \phi_f + (q \cdot N_A \cdot x_d) / (C_{OX} \cdot L) \cdot (L - Y_S - Y_D) \times \\ \times \left\{ (1 + z_x/Z) - \left\{ (1/2 + z_x/3 \cdot W) \cdot \left[(x_q + x_s)^2 - x_d^2 \right] + \right. \right. \\ \left. \left. + \left[(x_q + x_D)^2 - x_d^2 \right]^{1/2} - 2 \cdot x_q - Y_S - Y_D \right\} / (L - Y_S - Y_D) \right\} \quad (4.49)$$

Existem outros equacionamentos para a tensão de limiar do dispositivo MOS onde se considera uma formulação para as cargas na região de depleção como uma função das capacitâncias e das tensões dos eletrodos.

Esta avaliação para a tensão de limiar é encontrada, por exemplo, nos trabalhos de Turchetti e Masetti [31], Wright [43], Benumof et al [56], Chatterjee [60], Sheu et al [62], Lee [63], Wan e Sheu [64], Moon et al [65], Sheu et al [66], Chung [67], Huang e Gildenblat [68] e van Dort [79], e se apresenta, basicamente, da seguinte forma:

$$V_T = V_{FB} + 2 \cdot \phi_f + \gamma \left[(2 \cdot \phi_f + V_{SB})^{1/2} - (2 \cdot \phi_f)^{1/2} \right] \quad (4.50)$$

onde γ representa o "efeito de corpo" e é expresso por:

$$\gamma = (2 \cdot q \cdot \epsilon_s \cdot N_A)^{1/2} / C_{ox} \quad (4.51)$$

Modelos Analíticos para a Região de Sublimiar

As primeiras análises das características de corrente assumiam uma tensão de limiar discreta implicando em uma transição abrupta entre as condições de depleção e inversão do canal.

Além disto, os primeiros trabalhos desenvolvidos para a simulação de circuitos concentravam-se na operação do dispositivo acima do limiar por ser esta a região de maior importância [30],[73].

Taylor [77] apresentou o que pode ser considerada como a primeira modelagem analítica para a região de sublimiar (também denominada de região de fraca inversão) de um dispositivo MOS de canal longo.

Com o posterior interesse e a extensão de operação do transistor MOS para esta região de operação que é muito importante em circuitos de memória, em circuitos lógicos que operam com baixas tensões e em alguns circuitos analógicos verifica-se um aumento na demanda por esta modelagem [30],[74],[75].

Dentro desta linha de modelagem, uma das maiores preocupações é a garantia de uma continuidade da corrente quando se faz a transição entre as regiões de sublimiar e acima

do limiar. Muitos métodos têm sido propostos e utilizados para se manter esta condição e alcançar-se uma transição suave.

Nas modelagens analíticas envolvendo a condição de sublimiar, encontra-se um termo clássico, estabelecido por Barron, que descreve a dependência exponencial da corrente com a tensão de dreno para um dispositivo de canal longo. Este termo é dado por:

$$1 - e^{-V_{DS} \cdot (q/KT)} \quad (4.52)$$

Verifica-se que as propostas dentro desta modelagem procuram incluir, a partir desta dependência clássica exposta pelo termo da Eq. (4.52), outros termos e parâmetros de ajuste com a finalidade de se aumentar a precisão dos resultados obtidos principalmente em dispositivos onde se manifestam os efeitos de pequena geometria.

A título de exemplo, mostra-se a modelagem proposta por Jeng et al [29] que estabelece para a corrente de sublimiar a seguinte equação:

$$I_{Dsubth} = \beta_o \cdot (K \cdot T/q)^2 \cdot e^{\frac{(V_{GS} - V_T - V_{of})}{m \cdot K \cdot T/q}} \cdot [1 - e^{-V_{DS} \cdot (q/K \cdot T)}] \quad (4.53)$$

Outras contribuições para esta modelagem podem ser encontradas nos trabalhos de Poole e Kwong [74], Sheu et al [10], Chen et al [30], Chung e Sah [76], Benumof et al [56], Dunlop [75] e Klose e Seidl [103].

Modelos Analíticos Intrinsecamente de Ordem Superior

Existem ainda alguns modelos analíticos, embora as publicações a eles relacionadas não sejam tão extensas quanto as já mencionadas, que não necessariamente procuram adaptar as equações idealizadas do dispositivo.

Nestes trabalhos, basicamente se tem uma orientação no sentido de se manipular analiticamente a equação de Poisson através de uma definição bem estabelecida das condições de contorno dentro do volume de interesse [102].

Geralmente, este procedimento leva a modelos intrinsecamente de ordem superior e, como exemplos, podem-se citar os trabalhos de Lin e Wu [69], Kalonia e Jain [70], Kendall e Boothroyd [71] e Habas [72].

Outras Contribuições Dentro da Modelagem Analítica

Ainda dentro do contexto da modelagem analítica, podem ser relacionados alguns trabalhos que se inserem em um ou mais de um dos tópicos discutidos anteriormente e que se configurariam como uma complementação da bibliografia já citada.

Estes trabalhos são: Nguyen-Duc et al [87], Gildenblat e Huang [88], Barby et al [90], Ko [91], Sonoda et al [92], Wang [93], Masuda et al [94], Bagheri e Turchetti [95], Dimitrijević et al [96], Altschul e Diamand [97], Selberherr e Thurner [98], Pearce e Yaney [99], Ghibaudo [100], Tong [104], Hansch et al [105], Deen e Zuo [101], Molin [106] e Park et al

[116] e [119].

Modelagem Numérica

Aplicações mais sofisticadas, como o projeto e a otimização de dispositivos, requerem a utilização de uma modelagem que forneça níveis de precisão e de caracterização que nem sempre os modelos analíticos são capazes de fornecer.

Nestas situações, a demanda por esta modelagem mais realista é satisfeita com a utilização de simulações numéricas [1].

As primeiras simulações numéricas estavam centradas essencialmente em uma abordagem uni-dimensional dos dispositivos e, como exemplo, pode-se citar o trabalho de Gummel, proposto em 1964, como o precursor desta linha de pesquisa [1],[2].

Com o avanço nas tecnologias de fabricação de dispositivos, também as simulações numéricas se viram diante da necessidade do desenvolvimento de técnicas e métodos que proporcionassem uma maior precisão e uma melhor representação das características destes novos dispositivos.

Desenvolveram-se, conseqüentemente, as simulações bi-dimensionais que apresentam os primeiros trabalhos na década de setenta com os trabalhos de Kennedy, O' Brien, Slotboom, Cottrell, Buturla, Kotechha, Noble, Grossman e Salsburg por exemplo [1],[107].

Estes modelos numéricos podem representar com bastante precisão os efeitos de canal curto em dispositivos MOS.

Contudo, com o aparecimento de transistores MOS de canal estreito, esta modelagem necessitou de uma evolução adicional no sentido de alcançar uma simulação tri-dimensional.

Yoshii et al, por exemplo, demonstrou que a incorporação de efeitos tri-dimensionais era significativa em diversos tipos de dispositivos [1].

Como exemplos de softwares aplicativos destas simulações numéricas podem-se citar: PISCES, BAMBI, GALENE, MOS1, ADAM, MEDUSA, IMPEDANCE e as primeiras versões do MINIMOS, que são programas onde se estabelecem aproximações bi-dimensionais para esta modelagem [4],[20],[112],[113],[114],[118].

Outras contribuições, como as de Buturla et al [109], Toyabe et al [108], Chern et al [110], Thurner e Selberherr [111], evidenciam a necessidade de simuladores tri-dimensionais e apresentam as propostas de softwares aplicativos como: CADDETH, FIELDAY, SIERRA e a versão MINIMOS 5.

Estes softwares estão fundamentados na solução das equações básicas dos dispositivos semicondutores, através da utilização de um método para discretizá-las. Nos Caps. II e III discutiram-se com mais detalhes estes aspectos.

CAPÍTULO V

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.

Considerando-se como o início real do desenvolvimento tecnológico da estrutura do transistor de efeito de campo a fase (ii) proposta por Sah em [25], verifica-se que já se podem contabilizar mais de três décadas em que este dispositivo mereceu e vem merecendo a atenção de muitos pesquisadores em diferentes instituições, principalmente na Europa e nos Estados Unidos.

Como uma consequência deste longo período de dedicação, encontra-se uma numerosa e profícua quantidade de trabalhos e contribuições dentro da literatura científica que, a seu tempo, tem elevado o estado da arte dos transistores MOS.

Adicione-se a este fato a existência de muitos congressos, conferências e simpósios nos quais dispositivos MOS são, direta ou indiretamente, o tópico focalizado. Como exemplos destes encontros podem-se citar: International Electron Devices Meeting, European Solid State Devices Research Conference e International Conference on Simulation of Semiconductor Devices and Process.

No contexto nacional, merecem destaque os importantes eventos promovidos pela Sociedade Brasileira de Microeletrônica, em especial, os seus Congressos Anuais.

Dentro deste extenso espectro de publicações destacam-se neste trabalho, de uma forma mais específica, aquelas que dizem respeito ao modelamento de um tipo particular de dispositivo que é o transistor de efeito de campo MOS de enriquecimento.

Nas considerações gerais deste texto justifica-se a relevante importância que tal transistor desempenha, principalmente dentro das tecnologias de fabricação de circuitos integrados VLSI e ULSI, podendo ser acrescentada neste ponto, como um reforço a esta consideração, a afirmação de Tsividis feita em [19] em que o autor coloca como um ponto principal para o desenvolvimento do que hoje é referido como alta tecnologia, justamente a existência de dispositivos MOS.

Modelagem

Com a evolução dos processos de fabricação de dispositivos MOS tem-se verificado uma continua tendência para a fabricação de transistores com características geométricas cada vez mais reduzidas, sendo que atualmente é possível encontrar-se comprimentos de canal que já romperam a barreira de 1 μm .

Esta evolução tecnológica gerou uma demanda na qual o modelamento destes dispositivos se viu obrigado a sofrer uma evolução paralela. Principalmente para inserir uma série de efeitos que distanciam sobremaneira a previsão das

características dos transistores de pequena geometria com relação as estabelecidas para os primeiros dispositivos desenvolvidos, que se apresentavam essencialmente como sendo de grande geometria.

Portanto, deve-se reconhecer neste ponto que uma das principais chaves para se adquirir um amadurecimento na compreensão das características físicas e elétricas de dispositivos semicondutores de uma forma geral reside, com certeza, em um aprofundamento dos conceitos e da potencialidade que a modelagem pode fornecer.

Apesar desta necessidade de evolução e, conseqüentemente, de uma maior complexidade da modelagem, depara-se com um grupo de profissionais, principalmente ligados ao projeto de circuitos integrados, que solicitam modelos fáceis de serem implementados em máquinas de pequeno e médio porte e sejam rápidos no que diz respeito ao consumo de tempo da CPU, fornecendo respostas dentro de um padrão aceitável de precisão.

Esta abordagem, que em uma primeira aproximação pode ser considerada como sendo mais simplificada, é inserida dentro de um grupo denominado de Modelagem Analítica, onde se procurou agrupar todos os modelos que satisfizessem primordialmente este aspecto do projeto de CIs.

Em contrapartida, existem aplicações que são colocadas como pertencentes a um grupo mais sofisticado. A otimização do desempenho de uma dada estrutura para o transistor MOS ou mesmo o projeto de uma nova estrutura são exemplos bastante significativos.

Nestes casos, os níveis de precisão

requeridos, bem como a profundidade do formalismo físico necessário, tornam prementes as solicitações de modelos mais realísticos e completos que, via de regra, não são encontrados como satisfatórios dentro das aproximações impostas pela modelagem analítica.

Resolveu-se denominar este grupo de modelos mais sofisticados de Modelagem Numérica e procurou-se inserir aqui todas as contribuições de modelos que levassem a estes objetivos.

Modelagem Numérica

Dentro da modelagem numérica, observa-se que a maioria dos softwares aplicativos disponíveis como, por exemplo, os programas CADDETH, FIELDAY, MOS1, SIERRA, ADAM e MINIMOS, utilizam como ponto de partida as equações clássicas que regem o fenômeno de transporte de cargas nos semicondutores.

Uma posterior manipulação matemática destas equações (geralmente as aplicações dos métodos dos elementos finitos ou das diferenças finitas) é feita para se obter um conjunto discreto de pontos.

Naturalmente, a escolha do número de pontos irá influenciar diretamente, tanto no que diz respeito a qualidade do modelo no seu aspecto de precisão quanto o tempo gasto de CPU para se completar todo o processamento.

Para se situar um exemplo desta quantidade de pontos, verifica-se que grades contendo mais de 1.000 pontos são comuns em programas que atribuem um caráter bi-dimensional ao

problema, enquanto que grades com mais de 10.000 pontos são comuns nos modelamentos tri-dimensionais.

Com relação ao tempo de CPU, obtém-se ganhos significativos se são utilizadas máquinas que apresentam um processamento vetorizado e/ou paralelo. Para um mesmo número de pontos pode-se reduzir o tempo de CPU em até uma ordem de grandeza.

Acredita-se aqui que o preço pago pela utilização de máquinas mais poderosas (VAX 11/780, IBM 370, VECTOR S-180, CONVEX C240 e outras) justifique o maior grau de precisão e de confiabilidade dos resultados obtidos.

Verifica-se, ainda, que existe uma tendência, dentro do desenvolvimento destes softwares aplicativos, em se acompanhar os progressos resultantes dos processos de fabricação. Em outras palavras, a evolução destes programas tem sido no sentido de se tratar cuidadosamente as equações básicas que regem o comportamento dos dispositivos procurando-se atribuir a estas uma formulação bi ou tri-dimensional, conforme a exigência geométrica destes dispositivos.

As equações que relacionam as distribuições de cargas e potenciais, conseqüentemente uma função das linhas de campo elétrico e da geometria do dispositivo, são as que parecem ditar esta transição entre um software ser bi ou tri-dimensional.

Em algumas referências (por exemplo, [107],[108],[109],[112],[120]), encontram-se confrontações de dados levantados experimentalmente com os resultados advindos da simulação numérica, inclusive para transistores com geometrias de canal relativamente reduzidas (comprimentos de canal da ordem de $0.7 \mu\text{m}$ e largura de canal da ordem $1,5 \mu\text{m}$).

Observa-se, contudo, que estes trabalhos não trazem diretamente especificados valores percentuais de erros como resultado de uma comparação entre os levantamentos práticos e as simulações. Exibem, entretanto, dentre outras informações, características I x V, onde curvas teóricas e experimentais são plotadas simultaneamente.

As concordâncias entre os dois resultados podem ser avaliadas como sendo excelentes para todas as faixas de operação do dispositivo, consolidando desta forma a idéia sobre o alto grau de precisão imposto por estes métodos numéricos.

Uma publicação bastante interessante é a de Meinerzhagem e Dirks [115], que se constitui um exemplo muito bom de comparação entre dois modelos analíticos e dois modelos numéricos.

Diversas curvas são levantadas para dois transistores com comprimentos de canal de $3,3 \mu\text{m}$ e de $1 \mu\text{m}$. e considera-se que estes resultados podem levar o leitor a uma boa visualização dos aspectos relativos ao grau de precisão impostos por estas duas filosofias de modelagem.

Outro aspecto de grande importância que se pode extrair da modelagem numérica é que este tipo de modelamento apresenta-se como possuidor de uma grande versatilidade e flexibilidade, pois os resultados que são possíveis de serem extraídos não se limitam apenas as características estáticas do dispositivo (características I-V).

Obtém-se também respostas a transientes, a operações a pequeno sinal e, sobretudo, o que se julga ser de vital importância para a otimização de um dado dispositivo ou mesmo o projeto de novas estruturas, as visualizações bi e tri-dimensionais de algumas variáveis físicas como, por exemplo,

as distribuições de potenciais eletrostáticos, as concentrações de portadores e as componentes de densidades de corrente.

Outro fator que parece se apresentar como um ponto bastante favorável ao desenvolvimento de técnicas de modelamento numérico é a tendência que algumas publicações apontam no sentido da produção de dispositivos em escalas nanométricas. Certamente, dispositivos com estas escalas de geometria, necessitarão de uma fundamentação física baseada em formulações quânticas que a modelagem analítica, ao que tudo indica, não será capaz de suprir.

Pode ainda ser detectada, dentro da modelagem numérica, uma tendência mais atual que é a utilização da técnica ou do método de Monte Carlo (programa DAMOCLES, por exemplo) em lugar das equações clássicas dos semicondutores.

Este método, considerado por Ricco et al em [12] como uma solução quase ideal para a solução de simulações de dispositivos, encontra, contudo, uma necessidade bastante intensa de recursos computacionais, que pode se traduzir, a primeira vista, como uma desvantagem a ser cuidadosamente avaliada.

Entretanto, como se verifica no presente momento um rápido desenvolvimento da informática de um modo geral, acredita-se que a modelagem numérica que utiliza o método de Monte Carlo pode configurar-se como uma ferramenta bastante viável, principalmente para aprimorar ainda mais o desenvolvimento tecnológico do transistor MOS.

Conclui-se este tópico reconhecendo que, dentre os vários softwares de simulação numérica disponíveis, o programa MINIMOS Versão 5 (muitas vezes citado em outras publicações relativas a modelagem analítica como um padrão de simulação "exata" para efeito de comparação) desenvolvido por

Thurner e Selberherr [111] (pesquisadores junto ao Institut für Mikroelectronic, Technische Universität Wien, Austria), representa um dos melhores exemplos do estado da arte em simulação numérica bi e tri-dimensional.

Modelagem Analítica

Dentro do contexto da modelagem dos transistores MOS, verifica-se que a modelagem analítica responde por aproximadamente 80% das publicações pesquisadas.

Entende-se que, sendo na atualidade a microeletrônica, ou mais precisamente o projeto de circuitos integrados, uma área que apresenta uma grande quantidade de profissionais envolvidos, este fato, por si só, justificaria este interesse contínuo por esta abordagem do modelamento dos dispositivos.

Frequentemente, o projetista de CIs pode se deparar com circuitos digitais ou analógicos em que é possível se encontrar milhares de transistores MOS integralizados em uma única pastilha.

É fundamental que este profissional disponha de uma ferramenta que lhe seja útil no sentido em que possa obter, de uma forma confiável, ágil e precisa, informações sobre o circuito sob teste. Principalmente no que diz respeito ao seu desempenho quanto as suas características elétricas como, por exemplo, curvas corrente x tensão, condutâncias, transcondutâncias, etc.

Diferenciando-se em poucas palavras a

modelagem analítica da modelagem numérica, dir-se-ia que a primeira fornece, essencialmente, uma avaliação de caráter macroscópica do dispositivo, enquanto que, em contrapartida, a modelagem numérica pode fornecer uma avaliação de caráter microscópico.

Acredita-se que o fato da modelagem analítica não conseguir alcançar este nível microscópico do funcionamento do dispositivo não se traduz em uma desvantagem para esta linha de modelamento, pois questionar-se-ia até que ponto esta característica seria realmente importante para o projetista de circuitos integrados.

Levando-se em consideração a maior participação nos trabalhos pesquisados e a característica macroscópica da modelagem analítica, conclui-se que esta linha de pesquisa dentro do modelamento de dispositivos semicondutores atendeu e vem atendendo de forma bastante satisfatória a demanda imposta pelos projetistas de CIs.

Além disto, configura-se ainda como um assunto merecedor de futuros projetos de pesquisa, pois não se pode estabelecer que a tecnologia de fabricação de dispositivos tenha atingido o seu clímax, e que novas geometrias e/ou estruturas não sejam viáveis de serem desenvolvidas.

Observando-se as publicações que tratam diretamente da modelagem analítica, verifica-se que algo em torno de 10% destas concentram seus esforços em modelos analíticos para transistores de canal longo e que, além disto, o número de tais publicações decresce à medida em que se avança no tempo.

Este fato se encaixa perfeitamente se sob o mesmo período de tempo atentar-se para a evolução dos processos de fabricação dos transistores MOS e a conseqüente diminuição das

dimensões destes dispositivos.

Poder-se-ia avaliar que os modelos de canal longo, ou modelos unidimensionais, não representam o atual estado da arte para estes dispositivos, pois hoje não seria aceitável negligenciar uma série de efeitos e consequências impostas pela reduções da geometria, principalmente se se está interessado na obtenção de resultados com um grau de precisão mais elevado.

Contudo, as equações estabelecidas através da modelagem analítica unidimensional, consideradas por muitos autores como equações de um dispositivo idealizado ou ainda um modelo clássico, devem ser reconhecidas como possuidoras de grande valia.

Em primeiro lugar, foi justamente a falta de concordância entre os resultados obtidos através da modelagem analítica uni-dimensional e os dados levantados experimentalmente para dispositivos com geometrias mais reduzidas que motivaram muitos pesquisadores a procurar compreender e a modelar os efeitos responsáveis por estas distorções.

Em segundo lugar, existem algumas aplicações dentro da eletrônica analógica em que os transistores são exclusivamente de canal longo, o que não justificaria a utilização de modelos de ordem superior.

Finalmente, ao se verificar os 90% restantes das publicações dentro da modelagem analítica, nota-se que a grande maioria destas (aproximadamente 94%) procuram introduzir novos termos ou parâmetros de ajuste no modelo clássico, ou seja, o modelo clássico é o ponto de partida para as formulações propostas dentro deste contexto.

O objetivo fundamental, nestes casos, é a

adaptação do modelo clássico de modo a torná-lo coincidente com os resultados obtidos em levantamentos experimentais ou mesmo quando são feitas confrontações com simulações numéricas mais sofisticadas e intrinsecamente com maior nível de precisão.

Tal procedimento confere a estas equações modificadas, dependendo do grau e da quantidade de parâmetros de ajuste adicionados, uma extensão da modelagem analítica unidimensional para dimensões superiores, ou seja, uma modelagem analítica bi e/ou tri-dimensional.

Os outros 6% das publicações representam uma linha onde se procura obter soluções analíticas a partir da utilização das equações clássicas dos semicondutores. Por comparação direta destes percentuais (94% contra 6%), parece lógico concluir que os modelos adaptados do modelo clássico representam a tendência de direcionamento no desenvolvimento dos projetos de pesquisas dentro desta área.

Ao se considerar a inserção destes parâmetros de ajuste imposta pelos modelos analíticos adaptados ao modelo clássico, nota-se que merece um destaque maior aquelas publicações que tratam da mobilidade (velocidade) dos portadores e da tensão de limiar.

Em menor escala encontram-se as contribuições em outros aspectos como a modulação do comprimento do canal, as condições de sublimar e os efeitos de portadores "quentes".

É interessante, neste ponto, salientar que se torna um pouco difícil estabelecer valores percentuais relativos para a contribuição de cada um destes aspectos, pois há uma grande intersecção entre eles, sendo muito frequente nas publicações o tratamento simultâneo de um conjunto onde estão presentes mais de um destes parâmetros.

Entretanto, algumas observações importantes devem ser introduzidas neste momento.

Acompanhando-se a evolução dos modelos analíticos, verifica-se que a mobilidade dos portadores desempenha uma das efetivas fontes para a precisão do cálculo da corrente de Dreno.

São grandes os esforços para se estabelecerem modelos de mobilidade satisfatórios e, apesar disto, não se encontram formulações com bases puramente físicas, mas sim modelos com a presença de parâmetros empíricos que, via de regra, necessitam de levantamentos experimentais para se comprovar a sua validade.

No Cap. IV discutiu-se com mais detalhes as formulações propriamente ditas para estes modelos de forma que poupar-se-á a repetição desnecessária de algumas equações.

Os modelos derivados das propostas de Crawford, Trofimenkoff e Caughey apresentam-se com equações mais simples e, principalmente a proposta de Crawford, é frequentemente utilizada. Contudo se comparadas com os modelos evoluídos a partir da regra de Matthiessen (que apresenta equações semi-empíricas) parecem não alcançar o mesmo grau de precisão.

Outra vantagem que parece estar associada aos modelos derivados da regra de Matthiessen é o fato destes modelos possuírem uma melhor definição de seus parâmetros com relação a dependência da temperatura de operação do dispositivo, pois apresentam um tratamento mais aprofundado dos mecanismos de espalhamento dos portadores.

A tensão de limiar constitui-se outro

importante fator para o transistor MOS, razão pela qual é tão extensivamente tratada quanto a mobilidade.

Observa-se que os modelos mais antigos tratavam a tensão de limiar de uma forma discreta estabelecendo uma transição abrupta entre as condições de depleção e inversão.

Naturalmente esta consideração tornou-se insatisfatória por dois motivos. Primeiro, que muitas aplicações atuais, principalmente em se tratando de circuitos analógicos, estão com seus dispositivos operando em condições abaixo do limiar em situações de fraca ou moderada inversão. E, por outro lado, é necessário que seja mantida uma continuidade entre as transições destes níveis de inversão para se assegurar desta forma uma diferenciabilidade da equação da corrente de dreno, e com isto, refletir mais realisticamente parâmetros como a condutância do dispositivo.

Modelos que utilizam fatores de partição de cargas (baseados em aproximações geométricas para a distribuição das cargas no volume de interesse) como os propostos por Yau, Taylor e Dang aparecem como sendo os precursores dentro desta linha de pesquisa da tensão de limiar.

Contudo, observa-se que a presença de modelos derivados principalmente das condições de polarização do dispositivo e de suas capacitâncias sofre um crescente interesse e são frequentes, sobretudo, em publicações que apresentam propostas de softwares aplicativos a modelagem analítica.

Acredita-se, portanto, que estes modelos melhor representam a avaliação da tensão de limiar e que melhor se encaixam dentro da filosofia da modelagem analítica, que é a de fornecer uma visão macroscópica do dispositivo.

Neste ponto, julga-se importante salientar alguns fatos. Infelizmente a grande maioria das publicações ao fazerem as comparações entre resultados teóricos e dados experimentais (ou ainda resultados de simulações numéricas) não atribuem valores específicos de erros percentuais cometidos. Além disto, os dispositivos ensaiados apresentam-se com geometrias diversificadas e com diferentes perfis de dopagem.

Também, não se pode esperar que uma determinada publicação seja específica sobre um determinado parâmetro, pois o comportamento elétrico do dispositivo é uma consequência de uma série de eventos e efeitos que ocorrem simultaneamente.

Todas estas observações fazem com que a avaliação de um determinado modelo comparativamente a outro seja baseada na visualização de diversas curvas que são plotadas e principalmente na tentativa de se procurar sentir qual é a tendência imposta pelas publicações com o decorrer do tempo.

Softwares aplicativos também são encontrados na modelagem analítica. O programa SPICE (e suas versões como, por exemplo, o PSPICE e o HSPICE), desenvolvido na Universidade de Berkeley, configura-se como o mais utilizado dentre eles, pois se vê citado constantemente na literatura científica bem como por profissionais envolvidos com a microeletrônica e o projeto de circuitos integrados.

O SPICE pode ser considerado ainda um programa que apresenta uma excelente portabilidade tendo em vista a facilidade de sua implementação em máquinas de pequeno porte, como é o caso dos computadores pessoais da linha IBM PC.

Entende-se que este programa representa, através de seus modelos Level2 e Level3 , o atual estado da arte

da modelagem analítica bi e tri-dimensional dos dispositivos MOS.

Uma tendência de pesquisa que também se pode destacar das publicações pesquisadas e que deve ser ressaltada diz respeito a influência da temperatura nos modelos. Verifica-se um crescente interesse (tanto na modelagem analítica quanto na modelagem numérica) por modelos que descrevam o comportamento dos transistores MOS quando submetidos a ambientes com baixas temperaturas, que se situam principalmente na faixa do nitrogênio líquido.

Este interesse parece ser uma consequência dos atuais desenvolvimentos dos supercomputadores e também de microprocessadores que operam nesta classe de temperatura.

Recomenda-se a leitura dos trabalhos de Selberherr em [121] e [122] para modelos numéricos em baixa temperatura e os trabalhos de Gildenblat e Huang em [68],[81] e [88] para modelos analíticos em baixa temperatura.

Um ponto que chama bastante a atenção, principalmente dentro do contexto macroscópico da modelagem analítica, é a quase que completa ausência de publicações que tratam do desempenho dos modelos sob o aspecto da frequência dos sinais envolvidos.

Embora entendendo que o fato de se possuir informações a respeito das capacitâncias do dispositivo constitui-se em uma informação indireta do comportamento deste com relação à frequência, julga-se interessante deixar como uma proposta a realização de um trabalho específico sobre este aspecto.

Um Panorama da Modelagem de Dispositivos no Brasil

Ao se discutir sobre o modelamento de dispositivos semicondutores, particularmente no que diz respeito aos transistores MOS, com vários profissionais envolvidos com o projeto de circuitos integrados extrai-se um consenso de que a modelagem destes dispositivos, através de seus softwares aplicativos, e que teve-se a oportunidade de comentar neste trabalho, constitui-se uma importante e imprescindível ferramenta de apoio na caracterização dos componentes e na descrição de suas propriedades e características elétricas.

Verifica-se ainda que a modelagem de dispositivos, da maneira como enfocada neste trabalho, constitui-se em uma disciplina ministrada, principalmente ao nível de pós-graduação, em instituições de ensino superior que apresentam áreas de concentração em microeletrônica.

Não se constatou, entretanto, grupos de trabalho que estivessem prioritariamente envolvidos com o desenvolvimento de novos modelos para os transistores MOS, sobretudo no que concerne aos modelos analíticos.

Neste ponto, detecta-se ao nível de Brasil, duas instituições de ensino que consideradas centros de excelência apresentam em seu quadro docentes, pesquisadores e estagiários desenvolvendo trabalhos dentro do projeto de circuitos integrados e conseqüentemente intimamente inter-relacionados com os aspectos de modelagem.

Também como um consenso entre os vários profissionais com os quais comentou-se sobre o assunto estes grupos encontram-se lotados no Laboratório de Microeletrônica da Universidade de São Paulo e no Laboratório de Eletrônica e

Dispositivos da Universidade Estadual de Campinas.

Dentro do contexto da modelagem numérica são dignos de nota os trabalhos relacionados pelas referências [5] e [123] desenvolvidos no Departamento de Informática e Ciência da Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul que apresentam-se como propostas dentro da modelagem numérica uni e bi-dimensionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Snowden, M. C.
"Semiconductor Device Modelling"
Rep. Prog. Phys., Vol. 48, No 2, pp 223-275, 1985
- [2] Selberherr, S. and Langer, E.
"Three Dimensional Process and Device Modeling"
Microelectron. J., Vol.20, Nos. 1-2, pp 113-127, 1989
- [3] Fichtner, W. et al
"Semiconductor Device Simulation"
IEEE Trans. Electron. Dev., Vol. ED-30, No. 9, pp
1018-1030, 1983
- [4] Engl, W. L. et al
"Device Modeling"
Proc. IEEE, Vol. 71, No. 1, pp 10-33, 1983
- [5] Engel, P. M.
"Diodo: Simulador Unidimensional de Dispositivos
Eletrônicos Integrados"
Anais do IV Congresso da Sociedade Brasileira de

Microeletrônica, pp 183-193, 1989

- [6] Conti, M. and Turchetti C.
"On The Short- Channel Theory for MOS transistor"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 38, No 12, pp
2657-2661, 1991
- [7] Nagata, M.
"Limitations, Innovations and Challenges of Circuits
and Devices into a Half Micrometer and Beyond"
IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 27, No 4, pp
465-472, 1992
- [8] Miranda, H. and El Nokali, M.
"Simple Two-Sections Model for Short Channel Mos
Transistor in Saturation"
Int. J. Electron., Vol. 61, No. 4, pp 449-458, 1986
- [9] Schmitz, A. E. and Chen, J. Y.
"Design, Modeling and Fabrication of Subhalf-Micrometer
CMOS transistors"
IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-33, No. 1,
pp 148-153, 1986
- [10] Sheu, B. J. et al
"BSIM: Berkeley Short-Channel IGFET Model for MOS
Transistors"
IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. SC-22, No. 4, pp
558-565, 1987
- [11] Snowden, C. M.
"Practical Methods of Device and Circuit Modelling"
IEEE Inter. Symposium on Circuits and Systems Proc.,
Vol. 3, pp 2279-2282, 1988

- [12] Ricco, B. et al
"Monte Carlo Simulator for Semiconductor Devices"
Anais do VI Congresso da Sociedade Brasileira de
Microeletrônica, pp 18-49, 1991
- [13] Polak, S. J. et al
"Semiconductor Device Modelling from the Numerical
Point of View"
Int. J. for Numer. Methods in Engineering, Vol. 24, pp
763-838, 1987
- [14] Selberherr, S.
"The State of the Art in Device Simulation"
Anais do IV Congresso da Sociedade Brasileira de
Microeletrônica, pp 151-166, 1989
- [15] Fischetti, M. V. and Laux, S. E.
"Monte Carlo Analysis of Electron Transport in Small
Semiconductor Devices Including Band-Structure and
Space-Charge Effects"
Phys. Rev. B Condens. Matter, Vol. 38, No.14, pp
9721-9745, 1988
- [16] Venturi, F. et al
"A General Purpose Device Simulator Coupling Poisson
and Monte Carlo Transport with Applications to Deep
Submicron MOSFETs"
IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits, Vol.
8, No. 4, pp 360-369, 1989
- [17] Jeon, D. S. and Burk, D. E.
"MOSFET Electron Inversion Layer Mobilities - A
Physically Based Semi-Empirical Model for a Wide
Temperature Range"
IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 36, No. 8, pp

- 1456-1463, 1989
- [18] Baccarani, G. et al
"Modellistica dei Dispositivi a Semiconduttore"
Alta Freq., Vol. LVI, N. 5, pp 59-71, 1987
- [19] Tsividis, Y.
"Operation and Modeling of the MOS Transistor"
McGraw Hill Inc., 1987
- [20] Schytz, A. and Werner, C.
"State of the Art of MOS Modeling"
IEDM 84, pp 766-769, 1984
- [21] Zhang, Q. Z. and Schroder D. K.
"A New Long-Channel MOSFET Model"
Solid-State Electron., Vol. 30, No. 8, pp 859-864, 1987
- [22] Laux, S. E. et al
"Monte Carlo Analysis of Semiconductor Devices: The DAMOCLES Program"
IBM J. Res. Develop., Vol. 34, No.4, pp 466-494, 1990
- [23] Laux, S. E. and Byrnes, R. G.
"Semiconductor Device Simulation Using Generalized Mobility Models"
IBM J. Res. Develop., Vol. 29, No. 3, pp 289-301, 1985
- [24] Duvvury, C.
"A Guide to Short-Channel Effects in MOSFETs"
IEEE Circuits and Devices Magazine, Vol. 2, No. 6, pp 6-10, 1986
- [25] Sah, C. T.
"Evolution of the MOS Transistor - From Conception to

- VLSI"
Proc. IEEE, Vol. 76, No. 10, pp 1280-1326, 1988
- [26] DeMassa, T. A. and Chien, H. S.
"Threshold Voltage of Small-Geometry Si MOSFETS"
Solid-State Electron., Vol. 29, No. 4, pp 409-419, 1986
- [27] Fichtner, W.
"Submicron MOS Devices"
Microelectron. Engineering, Vol. 5, No. 1-4, pp
219-238, 1986
- [28] Fukuma, M. and Iizuka, T.
"Advanced Physical Models for MOSFETS"
Proc. of the Third International Conference, pp 57-69,
1988
- [29] Jeng, M. C. et al
"A Deep-Submicrometer MOSFET Model for Analog/Digital
Circuit Simulations"
Int. Electron Dev. Meeting Technical Digest, pp
114-117, 1988
- [30] Chan, P. C. et al
"A Subthreshold Conduction Model for Circuit Simulation
of Submicron MOSFET"
IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits, Vol.
CAD-6, No. 4, pp 574-581, 1987
- [31] Turchetti, C. and Masetti, G.
"A Charge-Sheet Analysis of Short-Channel
Enhancement-Mode MOSFETs"
IEEE J. Solid-State Circ., Vol. SC-21, No. 2, pp
267-275, 1986

- [32] Koomen, J
"Investigation of the MOST Channel Conductance in Weak Inversion"
Solid-State electron., Vol. 16, pp 801-810, 1973
- [33] Suh, C. H.
"A MOSFET Model of the Exponential Profile Approximation for Induced Carrier Density"
Solid-State Electronics, Vol. 32, No. 3, pp 215-220, 1989
- [34] Kenedy, D. P. and Murley P. C.
"Steady State Mathematical Theory for the Insulated Gate Field Effect Transistor"
IBM J. Res. Develop., Vol 17, No. 1, pp 2-12, 1973
- [35] Pao, H. C. and Sah, C. T.
"Effects of Diffusion Current on Characteristics of Metal-Oxide (Insulator) - Semiconductor Transistors"
Solid-State Electron., Vol. 9, pp 927-937, 1966
- [36] Abu-Zeid, M. M. and Jong, G. G.
"MOSFET Model Continuos From Weak to Strong Inversion"
Electron. Lett., Vol. 23, No. 24, pp 1299-1300, 1987
- [37] Toh, K. Y. et al
"An Engineering Model for Short-Channel MOS Devices"
IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 23, No. 4, pp 950-958, 1988
- [38] Ghibaudo, G.
"Analytical Modelling of the MOS Transistor"
Phys. Status Solidi A, V. 113, No. 1, pp 223-240, 1989

- [39] Sodini, C. G. et al
"The Effect of High Fields on MOS Device and Circuit Performance"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. ED-31, No. 10, pp 1386-1393, 1984
- [40] Bhatti, G. S. et al
"A Model for MOS Transistors"
IEE Proc., Vol. 132, pt I, No. 6, pp 248-252, 1985
- [41] Hiroki, A. et al
"A Mobility Model for Submicrometer MOSFET Simulations Including Hot-Carrier-Induced Device Degradation"
IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 35, No. 9, pp 1487-1493, 1988
- [42] Ghibaudo, G.
"An Analytical Model of Conductance and Transconductance for Enhanced-Mode MOSFET"
Phys. Stat. Sol. (a), 95, pp 323-335, 1986
- [43] Wright, G. T.
"Simple and Continuous MOSFET Models for the Computer Aided Design of VLSI"
IEE Proc., Vol. 132, pt I, No. 4, pp 187-194, 1985
- [44] Lauwers, L. and DeMeyer, K.
"Novel Calculations in the Field of Accurate Analytical MOS Transistor Modelling"
Journal de Physique, Colloque C4, Vol. 49, pp 249-252, 1988
- [45] Grotjohn, T. and Hoefflinger, B.
"A Parametric Short-Channel MOS Transistor Model for Subthreshold and Strong Inversion Current"

- IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. SC-19, No. 1, pp 100-112, 1984
- [46] Gharabagi, R. and El Nokali, M.
"A Charge-Based Model for Short-Channel MOS Transistor Capacitances"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 17, No. 4, pp 1064-1073, 1990
- [47] Masuda, H. et al
"A Submicrometer MOS Transistor I-V Model for Circuit Simulation"
IEEE Trans. Comput. -Aided Des. Integr. Circuits Syst., Vol. 10, No. 2, pp 161-170, 1991
- [48] Smeds, T.
"Effect of Velocity Saturation on Small Signal Behaviour of Submicron MOSFETs: Analytical Modelling and 2-D Simulations"
ESSDERC'89. 19th European Solid State Devices Research Conference, pp 435-438, 1989
- [49] Dejenfelt, A. T.
"An Analytical Model for the Internal Electric Field in Submicrometer MOSFETs"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 37, No.5, pp 1352-1363, 1990
- [50] El Banna, M. and El Nokali, M.
"A Pseudo-Two-Dimensional Analysis of Short Channel MOSFETs"
Solid-State Electronics, Vol. 31, No. 2, pp 269-274, 1988

- [51] El Nokali, M. and Miranda, H.
"A Simple Model for the MOS Transistor in Saturation"
Solid-State Electronics, Vol. 29, No. 6, pp 591-596,
1986
- [52] Satter, J. H.
"The S-Model: A Highly Accurate MOST Model for Cad"
Solid-State Electron., Vol. 29, No. 9, pp 977-990, 1986
- [53] Lee, K. et al
"Physical Understanding of Low-Field Carrier Mobility
in Silicon MOSFET Inversion Layer"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 38, No. 8, pp
1905-1911, 1991
- [54] Ohno, Y.
"Electron Viscosity Effects on Electron Drift Velocity
in Silicon MOS Inversion Layers"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 38, No. 8, pp
1889-1894, 1991
- [55] Bose, S. C. et al
"Review of MOS Models for Use in Computer - Aided
Design (Circuit Simulation) of LSI Circuits"
IETE Tech. Rev.(India), Vol. 3, No. 7, pp 299-306, 1986
- [56] Benumof, R. et al
"Models of Second - Order Effects in Metal - Oxide -
Semiconductor Field - Effect Transistors for Computer
Applications"
J. Appl. Phys., Vol. 63, No. 10, pp 5131-5142, 1988
- [57] Guebels, P. P. and Van de Wiele, F.
"A Small Geometry MOSFET Model for CAD Applications"
Solid - State Electron., Vol. 26, No. 4, pp 267-273,

1983

- [58] Budde, W. and Lamfried, W. H.
"A Charge - Sheet Capacitance Model Based on Drain Current Modeling"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 37, No. 7, pp 1678-1687, 1990
- [59] Huang, C. L. and Gildenblat, G.
"Measurements and Modeling of the n - Channel MOSFET Inversion Layer Mobility and Device Characteristics in the Temperature Range 60 - 300 K"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 37, No. 5, pp 1289-1300, 1990
- [60] Chatterjee, A. et al
"A Submicron MOSFET Model for Simulation of Analog Circuits"
IEEE Trans. Inter. Conference on Comput. -Aided Des. ICCAD - 89, pp 120-123, 1988
- [61] Charlot, J. J. and Toutain, S.
"Distributed Charge (Sub)Micron MOS Transistor Model"
IEE Proc., Vol. 133, Pt. I, No. 6, pp 207-213, 1986
- [62] Sheu, B. J. et al
"A Compact IGFET Model"
IEEE Trans. Circuits and Syst. Vol. CAS-31, No. 8, pp 745-748, 1984
- [63] Lee, S. W.
"Universality of Mobility-Gate Field Characteristics of Electrons in the Inversion Charge Layer and its Application in MOSFET Modeling"
IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst.,

- Vol. 8, No.7, pp 724-730, 1989
- [64] Wan, C. P. and Sheu, B. J.
"New Method for Determination of Geometric Dependences of Submicrometre MOS transistor parameters"
IEE Proc., Vol. 137, Pt. G, No. 4, pp 275-278, 1990
- [65] Moon, B. J. et al
"Analytical Model for p-Channel MOSFETS"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 38, No. 12, pp 2632-2646, 1991
- [66] Sheu, B. J. et al
"An MOS Transistor Charge Model for VLSI Design"
IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst., Vol. 7, No. 4, pp 520-527, 1988
- [67] Chung, S. S. S.
"A Complete Model of the I-V Characteristics for Narrow Gate MOSFETS"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 37, No. 4, pp 1020-1030, 1990
- [68] Huang, C. L. and Gildenblat, G. S.
"Engineering Model of MOS Transistors for the 60-300 K Temperature Range"
Electron. Lett., Vol. 26, No. 6, pp 365-367, 1990
- [69] Lin, P. S. and Wu, C. Y.
"A New Approach to Analytically Solving the Two - Dimensional Poisson's Equation and its Application in Short - Channel MOSFET Modeling"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. ED-34, No. 9, pp 1947-1956, 1987

- [70] Kalonia, K. S. and Jain, F. C.
"An Analytical Two - Dimensional Model for CMOS Devices at Room and Cryogenic Temperatures"
Solid-State Electron., Vol. 33, No. 7, pp 947-951, 1990
- [71] Kendall, J. D. and Boothroyd, A. R.
"A Two - Dimensional Analytical Solution of the Poisson and Current Continuity Equations for the Short - Channel MOSFET"
Solid-State Electron., Vol. 33, No. 5, pp 537-551, 1990
- [72] Habas, P.
"A Physics Based Analytical MOSFET Model with Accurate Field Dependent Mobility"
Solid-State Electron., Vol. 33, No. 7, pp 923-933, 1990
- [73] Troutman, R. R. and Chakravarti,
"Subthreshold Characteristics of Insulated - Gate Field - Effect Transistors"
IEEE Trans. Circuit Theory, Vol. CT-20, No. 6, pp 659-665, 1973
- [74] Poole, D. R. and Kwong, D. L.
"Analytical Modeling of the Subthreshold Current in Short - Channel MOSFETS"
IEEE Electron Dev. Lett., Vol. EDL-7, No. 6, pp 340-343, 1986
- [75] Dunlop, L.
"An Efficient MOSFET Current Model for Analog Circuit Simulation - Subthreshold to Strong Inversion"
IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 25, No. 2, pp 616-619, 1990

- [76] Chung, S. S. S. and Sah, C. T.
"A Subthreshold Model of the Narrow - Gate Effect in MOSFETS"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. ED-34, No. 12, pp 2521-2529, 1987
- [77] Taylor, G. W.
"Subthreshold Conduction in MOSFETS"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. ED-25, No. 3, pp 337-350, 1978
- [78] Ali-Omar, M. and Reggiani, L.
"Drift and Diffusion of Charge Carriers in Silicon and Their Empirical Relation to the Electric Field"
Solid-State Electronics, Vol. 30, No. 7, pp 693-697, 1987
- [79] van Dort, M. J. et al
"Influence of High Substrate Doping Levels on the Threshold Voltage and the Mobility of Deep Submicrometer MOSFETS"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 39, No. 4, pp 932-937, 1992
- [80] Hafez, I. M. et al
"Modelling of Electron Mobility in Silicon MOS Inversion and Accumulation Layers at Liquid Helium Temperature"
Electron. Lett., Vol. 26, No. 19, pp 1633-1635, 1990
- [81] Gildenblat, G. S. and Huang, C. L.
"Engineering Model of Inversion Channel Mobility for 60 - 300 K Temperature Range"
Electron. Lett., Vol. 25, No. 10, pp 634-636, 1990

- [82] Lee, J. I. et al
"Mobility Reduction Parameters in Short - Channel MOSFETS"
Electron. Lett., Vol. 25, No. 11, pp 753-754, 1989
- [83] Rothwarf, A.
"A New Quantum Mechanical Channel Mobility Model for Si - MOSFETS"
IEEE Electron Dev. Lett., Vol. EDL-8, No. 10, pp 499-502, 1987
- [84] Kang, J. S. et al
"Effective and Field - Effect Mobilities in Si MOSFETS"
Solid-State Electron., Vol. 32, No. 8, pp 679-681, 1989
- [85] Hiroki, A. et al
"A Mobility Model for Submicrometer MOSFET Device Simulations"
IEEE Electron Dev. Lett., Vol. EDL-8, No. 5, pp 231-233, 1987
- [86] Chung, S. S. S. and Sah, C. T.
"Threshold Voltage Models of the Narrow - Gate Effect in Micron and Submicron MOSFETS"
Solid-State Electron., Vol. 31, No. 6, pp 1009-1988
- [87] Nguyen-Duc, C. et al
"A Three - Piece Model of Channel Length Modulation in Submicrometer MOSFETS"
Solid-State Electron., Vol. 31, No. 6, pp 1057-1063, 1988
- [88] Gildenblat, G. S. and Huang, C. L.
"N Channel MOSFET Model for the 60 - 300 K Temperature Range"

- IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst.,
Vol. 10, No. 4, pp 512-518, 1991
- [89] Vogel, R. F.
"Analytical MOSFET Model with Easily Extracted
Parameters"
IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst.,
Vol CAD-4, No. 2, pp 127-134, 1985
- [90] Barby, J. A. et al
"Polynomial Splines for MOSFET Model Approximation"
IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst.,
Vol. 7, No. 5, pp 557-566, 1988
- [91] Ko, P. K.
"MOS Device Modeling for Circuit Simulation"
Inter. Electron Dev. Meeting Technical Digest, pp
488-491, 1985
- [92] Sonoda, et al
"Analytical Device Model for Submicrometer MOSFETS"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 38, No. 12, pp
2662-2668, 1991
- [93] Wang, C. T.
"A New Set of Semiconductor Equations for Computer
Simulation of Submicron Devices"
Solid-State Electron., Vol. 28, No. 8, pp 783-788, 1985
- [94] Masuda, H. et al
"A Unified Sub- μm MOSFET CAD MODEL"
Inter. Electron Dev. Meeting Technical Digest, pp
118-121, 1988

- [95] Bagheri, M. and Turchetti, C.
"The Need for an Explicit Model Describing MOS Transistors in Moderate Inversion"
Electron. Lett., Vol. 21, No. 19, pp 873-874, 1985
- [96] Dimitrijević, S. et al
"New Analytical Expression for the Drain Current of Short - Channel MOS Transistors in the Triode Region"
Electron. Lett., Vol. 23, No. 16, pp 862-864, 1987
- [97] Altschul, V. and Diamand, Y. S.
"Modeling of the MOSFET Inversion Charge and Drain Current in Moderate Inversion"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 37, No. 8, pp 1909-1914, 1990
- [98] Thurner, M. and Selberherr, S.
"3D MOSFET Device Effects due to Field Oxide"
J. Phys. Colloq., C-4, No. 9, Vol. 49, pp 245-248, 1988
- [99] Pearce, C. W. and Yaney, D. S.
"Short - Channel Effects in MOSFETS"
IEEE Electron Lett., Vol. EDL-6, No. 7, pp 326-328, 1985
- [100] Ghibaudo, G.
Analytical Modeling of the Transconductance of Short Channel MOSFETS in the Saturation Region"
Solid-State Electron., Vol. 32, No. 1, pp 87-89, 1989
- [101] Deen, M. J. and Zuo, Z. P.
"Edge Effects in Narrow - Width MOSFETS"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 38, No. 8, pp 1815-1819, 1991

- [102] Marash, V. and Dutton, R. W.
"Methodology for Submicron Device Model Development"
IEEE Trans. Comput Aided Des. Integr. Circuits Syst.,
Vol. 7, No. 2, pp 299-306, 1988
- [103] Klose, H. and Seidl, A.
"Combined Process Modeling and Subthreshold Device
Simulation"
Solid-State Electron. Vol. 29, No. 3, pp 371-375, 1986
- [104] Tong, K. Y.
"Conduction in Ohmic Region of Submicrometer MOSFET"
IEE Proc., Vol. 136, Pt. G, No. 5, pp 260-262, 1989
- [105] Hansch, W. et al
"The Hot - Electron Problem in Submicron MOSFET"
J. Phys., Colloq. C-4, No. 9, Vol. 49, pp 597-606, 1988
- [106] Molin, B. A.
"On MOS Transistor Model Accuracy"
Microelectron. J., Vol. 18, No. 1, pp 5-11, 1986
- [107] Ji, C. R. and Sah, C. T.
"Two Dimensional Numerical Analysis of the Narrow Gate
Effect in MOSFETS"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. EDL-30, No. 6, pp
635-647, 1983
- [108] Toyabe, T. et al
"Three Dimensional Device Simulator CADDETH with
Highly Convergent Matrix Solution Algorithms"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. ED-32, No. 10, pp
2038-2044, 1985

- [109] Buturla, E. M. et al
"Finite Element Analysis of Semiconductor Devices: The Fielday Program"
IBM J. Res. Develop., Vol. 25, No. 4, pp 218-231, 1981
- [110] Chern, J. H. et al
"SIERRA: A 3-D Device Simulator for Reliability Modeling"
IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst., Vol. 8, No. 5, pp 516-527, 1989
- [111] Thurner, M. and Selberherr, S.
"Three - Dimensional Effects Due to the Field Oxide in MOS Devices Analyzed with MINIMOS 5"
IEEE Trans. Comput. Aided Des., Vol. 9, No. 8, pp 856-867, 1990
- [112] Wilson, C. L. and Blue, J. L.
"Accurate Current Calculation in Two - Dimensional MOSFET MODELS"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. ED-32, No. 10, pp 2060-2068, 1985
- [113] Williams, R. A. and Pattanayak, D. N.
"ADAM: A Two - Dimensional, Two - Carrier MOSFET Simulator Based on Generalized Stream Functions"
IEEE Trans. Comput Aided Des. Integr. Circuits Syst., Vol. 7, No. 2, pp 243-250, 1988
- [114] Selberherr, S. et al
"Minimos - A Two - Dimensional MOS Transistor Analyzer"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. ED-27, No. 8, pp 1540-1550, 1980

- [115] Meinerzhagen, B. and Dirks, H. K.
"A Comparison of Numerical and Analytical Short Channel MOST - Models"
Device and Process Simulation Conf., Swansea, pp 391-405, 1984
- [116] Park, H. J. et al
"A Charge Conserving Non - Quasi - Static (NQS) MOSFET Model for SPICE Transient Analysis"
IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst., Vol. 10, No. 5, pp 629-642, 1991
- [117] Brews, J. R.
"A Charge Sheet Model of the MOSFET"
Solid-State Electron., Vol. 21, pp 345-355, 1978
- [118] Asenov, A. M. et al
"Numerical Analysis of MOS Transistor Effective Channel Width"
Electron. Lett., Vol. 21, No. 14, pp 595-597, 1985
- [119] Park, H. J. et al
"A Non - Quasi - Static MOSFET Model for SPICE - Transient Analysis"
- [120] Huang, C. G. and Dutton, R. W.
"Improved Physical Modeling of Submicron MOSFETS Based on Parameter Extracion Using 2-d Simulation"
IEEE Trans. Comput Aided Des., Vol. 8, No. 4, pp 370-378, 1989
- [121] Selberherr, S.
"MOS device Modeling at Liquid - Nitrogen Temperature"
Inter. Electron Devices Meeting Technical Digest, pp 496-499, 1988

- [122] Selberherr, S.
"MOS Device Modeling at 77 K"
IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 36, No. 8, pp
1464-1474, 1989
- [123] Engl, P. M.
"Ambiente de Simulação de Dispositivos Semicondutores
Bidimensionais"
Anais do V Congresso da Sociedade Brasileira de
Microeletrônica, pp 174-183, 1990.

