

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia Eletrônica

ISSN 1413-2206

BT/PEE/9702

**Analysis of the Subthreshold Slope
Transition Region in SOI nMOSFET**

**Victor Sonnenberg
João Antonio Martino**

São Paulo - 1997

O presente trabalho é um resumo da dissertação de mestrado apresentada por Victor Sonnenberg, sob orientação do Prof. Dr. João Antonio Martino: "Análise da Região de Sublimar em Transistor SOI MOSFET em Temperatura Ambiente e Criogênica ($T = 77K$)", defendida em 20/12/96, na Escola Politécnica.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na Biblioteca de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica/USP.

Sonnenberg, Victor

Analysis of the subthreshold slope transition region in SOI nMOSFET / V. Sonnenberg, J.A. Martino. -- São Paulo : EPUSP, 1997.

p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Eletrônica, BT/PEE/9702)

1. Microeletrônica 2. Transistores a efeito de campo I. Martino, João Antonio II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Eletrônica III. Título IV. Série
ISSN 1413-2206

CDD 621.381

621.3815284

"Analysis of the Subthreshold Slope Transition Region in SOI nMOSFET"

Victor Sonnenberg¹ and João Antonio Martino

LSI - Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto, 158 trav.3 - CEP 05508-900 São Paulo, Brasil

Tel: +55 (11) 818 5657 - FAX: +55 (11) 818 5665

¹Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC/SP

EMAILs : sonnen@lsi.usp.br and martino@lsi.usp.br

ABSTRACT

Measurements were performed in thin film SOI MOSFET and it was observed a transition region larger than the theoretically expected in the subthreshold Slope vs. back gate voltage when the silicon film/ buried oxide interface changes from depletion to accumulation.

MEDICI numerical bidimensional simulation were realized in order to analyze this transition region. Through the channel depletion depth it was possible to note that there is a back gate voltage range where the back interface is not depleted from source to drain, depending on the front gate voltage, which influences strongly the determination of the subthreshold Slope resulting a non-abrupt transient region.

1- INTRODUCTION

The SOI CMOS technology has presented many advantages over bulk CMOS as improved subthreshold Slope, high transconductance and suppression of the latch-up [1].

The subthreshold Slope is an important parameter to have good performance of the transistor mainly in low voltage and low power operation and also to obtain process parameter like traps interface density (Nit) [2,3,4].

The SOI MOSFET cross section is shown in the figure 1.

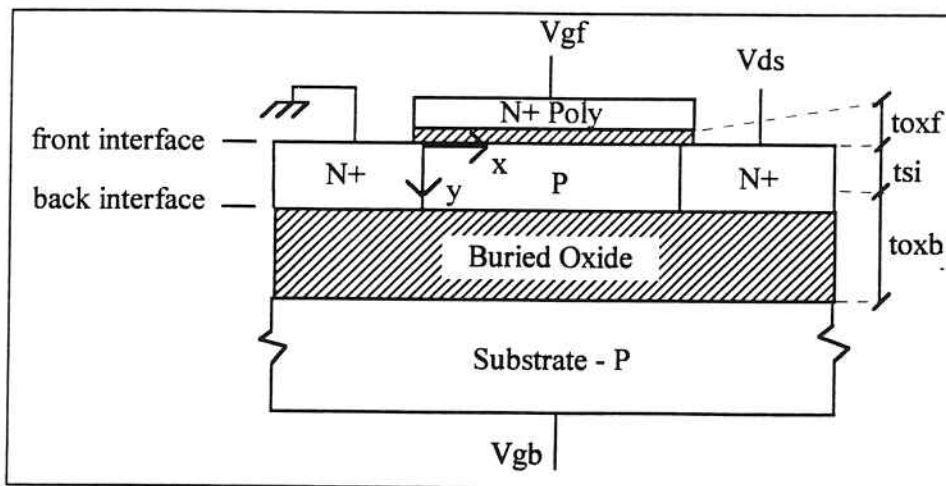


Fig. 1 - The SOI nMOSFET cross section.

In thin film SOI MOSFET, where silicon film thickness is lower than the maximum depletion depth ($t_{si} < d_{max}$), the back voltage value is very important to define the condition of back interface. If the back interface is depleted the transistor has low subthreshold Slope, around 60 mV/dec, but if the back interface is accumulated the subthreshold Slope increases to

around 100 mV/dec[5]. The ideal behavior can be seen in figure 2 where the influence of the back gate voltage in the subthreshold Slope and the front threshold voltage (V_{tf}) are shown.

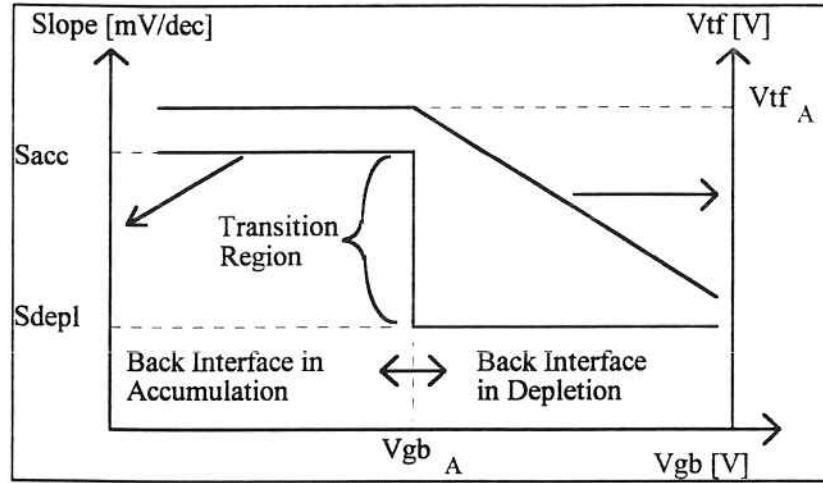


Fig. 2 - Ideal V_{tf} and subthreshold Slope vs. back gate voltage (V_{gb}) curve.

2 - BASIC MODELS

The subthreshold Slope is the inverse rate of the drain current change by the gate voltage. The expression of the subthreshold Slope is given in equation 1.

$$S = \frac{dV_g}{d \log I_d} = \frac{\ln 10}{\frac{d \ln I_d}{dV_g}} \quad (1) \quad \text{where}$$

$$\frac{d \ln I_d}{dV_g} = \frac{1}{I_d} \frac{\delta I_d}{\delta \Phi_s} \frac{\delta \Phi_s}{\delta V_g} = C \frac{\delta \Phi_s}{\delta V_g} \quad (2) \quad C = \frac{q}{KT} - \frac{\frac{d}{d\Phi_s} \left(-\frac{d\Phi_s}{dx} \right)}{-\frac{d\Phi_s}{dx}} \quad (3)$$

For fully depleted SOI MOSFET the correction factor C can be approximated by q/KT[5].

In bulk MOSFET, the equation of the gate voltage is given by eq. 4 [6] and the result of the subthreshold Slope can be seen in eq. 5.

$$V_g = -\frac{Q_{si}(\Phi_s)}{C_{ox}} + \Phi_s - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} - \frac{Q_{it}(\Phi_s)}{C_{ox}} + \Phi_{ms} \quad (4) \quad S = \frac{KT}{q} \ln(10) \left(1 + \frac{C_d + C_{it}}{C_{ox}} \right) \quad (5)$$

where C_{it} is the interface traps capacitance, C_d is the depletion capacitance and C_{ox} is the gate oxide capacitance.

In SOI MOSFET's the equations 1,2 and 3 are also valid. For thick film SOI MOSFET (t_{si} > 2d_{max}) the subthreshold Slope is the same that in bulk MOSFET but in thin film (t_{si} < d_{max}) it depends on the condition of the back interface.

If the back interface is depleted, there are a strong interaction between the front and back interface, which was modeled by Lim&Fossum [7] and taking in consideration the interface traps capacitance [5] is given by eqs. 6 and 7.

$$V_{gf} = \Phi_{ms_f} - \frac{Q_{ox_f}}{C_{ox_f}} + \Phi_{s_f} \left(1 + \frac{C_{it_f}}{C_{ox_f}} + \frac{C_{si}}{C_{ox_f}} \right) + \Phi_{sb} \left(-\frac{C_{si}}{C_{ox_f}} \right) + \frac{|Q_{depl}|}{2C_{ox_f}} \quad (6)$$

$$V_{gb} = \Phi_{ms_b} - \frac{Q_{ox_b}}{C_{ox_b}} + \Phi_{sb} \left(1 + \frac{C_{it_b}}{C_{ox_b}} + \frac{C_{si}}{C_{ox_b}} \right) + \Phi_{s_f} \left(-\frac{C_{si}}{C_{ox_b}} \right) + \frac{|Q_{depl}|}{2C_{ox_b}} \quad (7)$$

where $C_{itf} = qN_{itf}$, $C_{itb} = qN_{itb}$, N_{itf} and N_{itb} are the interface traps density of the front and back interface respectively and other parameter following the reference [5].

The expression for subthreshold Slope, with the back interface depleted (S_{depl}) is given by eq. 8.

$$S_{depl} = \frac{KT}{q} \ln(10) \left(1 + \frac{C_{it_f} + \frac{C_{si}(C_{it_b} + C_{ox_b})}{C_{it_b} + C_{ox_b} + C_{si}}}{C_{ox_f}} \right) \quad (8)$$

If the back interface is accumulated the subthreshold Slope is equal to the bulk MOSFET except for the replace of the depletion capacitance (C_d) to silicon capacitance (C_{si}).

The expression for subthreshold Slope with the back interface accumulation (S_{acc}) is given by eq. 9.

$$S_{acc} = \frac{KT}{q} \ln(10) \left(1 + \frac{C_{si} + C_{itf}}{C_{oxf}} \right) \quad (9) \quad \text{where} \quad C_{si} = \frac{\epsilon_{si}}{t_{si}}$$

3 - EXPERIMENTAL

The SOI devices used were edgeless nMOSFET's to avoid the influence of the parasitic edge transistor. The gate oxide thickness (t_{oxf}), silicon film thickness (t_{si}) and buried oxide thickness (t_{oxb}) were approximately 15, 70 and 390 nm, respectively. The channel doping concentration was approximately $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Figure 3 shows I_d vs. V_{gf} curves for different back gate voltage (V_{gb}) in SOI MOSFET with $L=1,5\mu\text{m}$ and $W=36\mu\text{m}$. This measurement was realized using the HP4145 with LONG integration time for elimination of the transient behavior [8]

The subthreshold Slope was obtained from the extrapolation line between the drain currents from 10^{-8} W/L to 10^{-10} W/L [9] and the front threshold voltage (V_{tf}) was got by the second derivative method [10].

Figure 4 shows the subthreshold Slope and V_{tf} vs. V_{gb} , and can be seen the not abrupt transition region between the S_{acc} and S_{depl} which is not modeled in equations 8 and 9. Ref. [4] considers this transition region due to a variation of N_{itb} .

We will try to explain this transition region using a numerical bidimensional simulation.

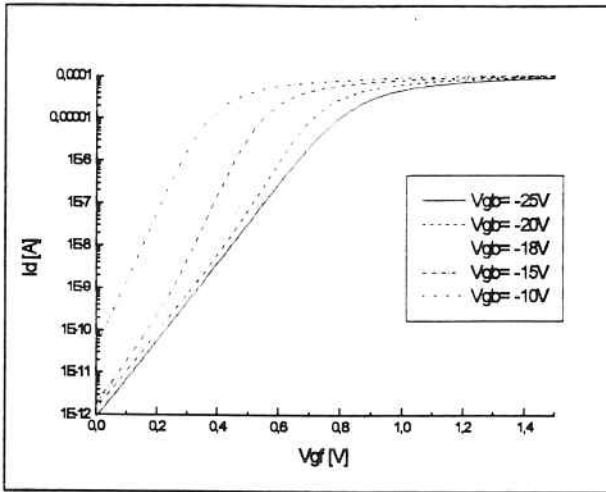


Fig. 3 - Experimental I_d vs. V_{gf} curves in SOI MOSFET with $L=1,5\mu m$ and $W=36\mu m$.

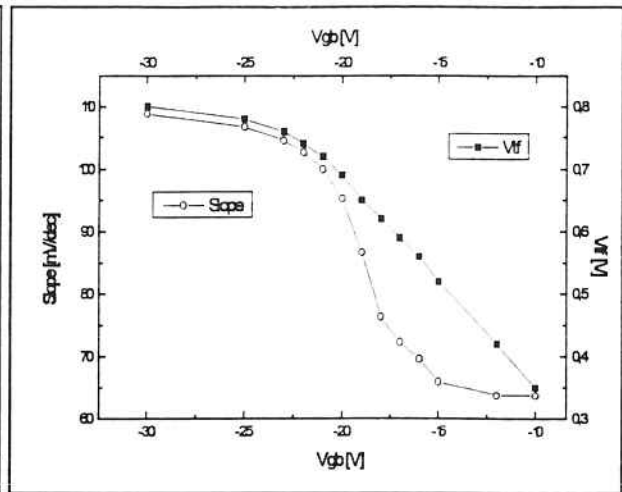


Fig. 4 - Slope and V_{tf} vs. V_{gb} in SOI MOSFET with $L=1,5\mu m$ and $W=36\mu m$.

4 - SIMULATION AND DISCUSSIONS

Using the numerical bidimensional simulator MEDICI, the SOI nMOSFET was simulated with $tox_f=15nm$, $tsi=80nm$, $tox_b=390nm$, $N_a=1E17cm^{-3}$ and $L=1\mu m$.

Considering $N_{itf}=0$ and $N_{itb}=0$ it were obtained the I_d vs. V_{gf} curves for some V_{gb} , shown in the figure 5. The figure 6 shows the Slope and V_{tf} vs. V_{gb} curves.

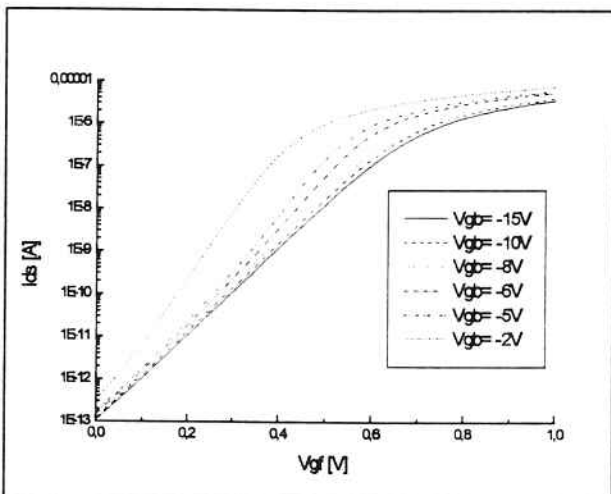


Fig. 5 - I_d x V_{gf} curves simulated in SOI nMOSFET with $L=1\mu m$ and $N_{it}=0$.

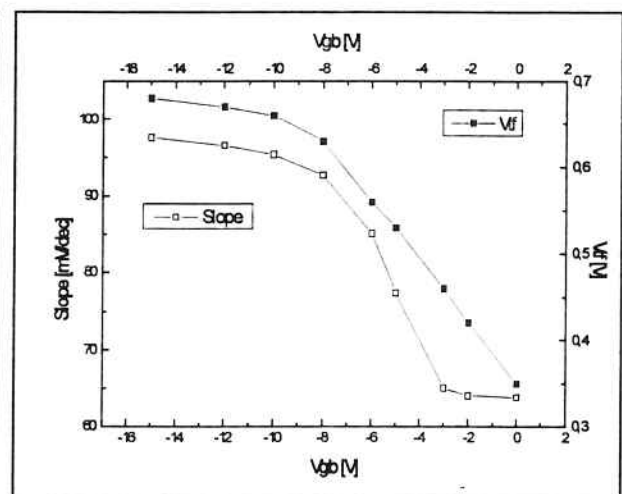
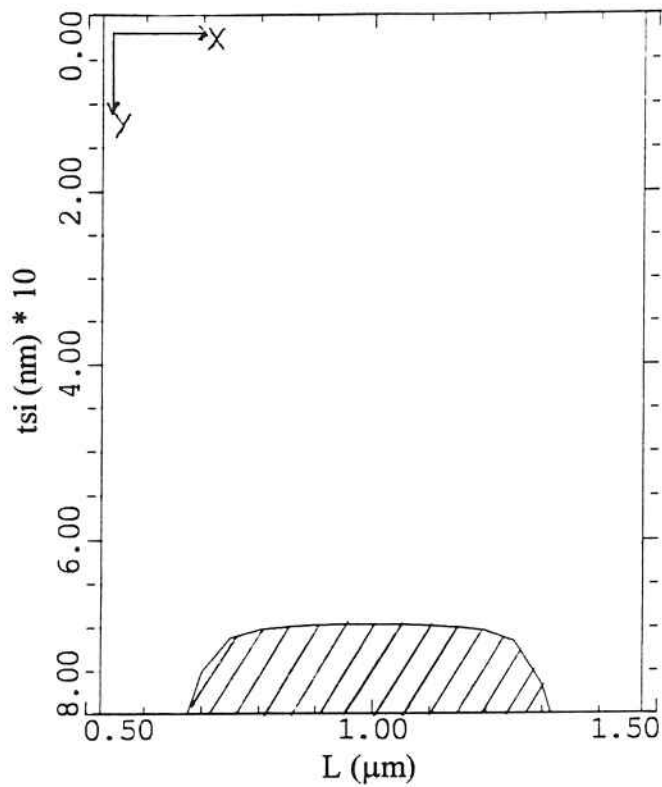


Fig. 6 - Slope and V_{tf} vs. V_{gb} curve simulated with $L=1\mu m$ and $N_{it}=0$.

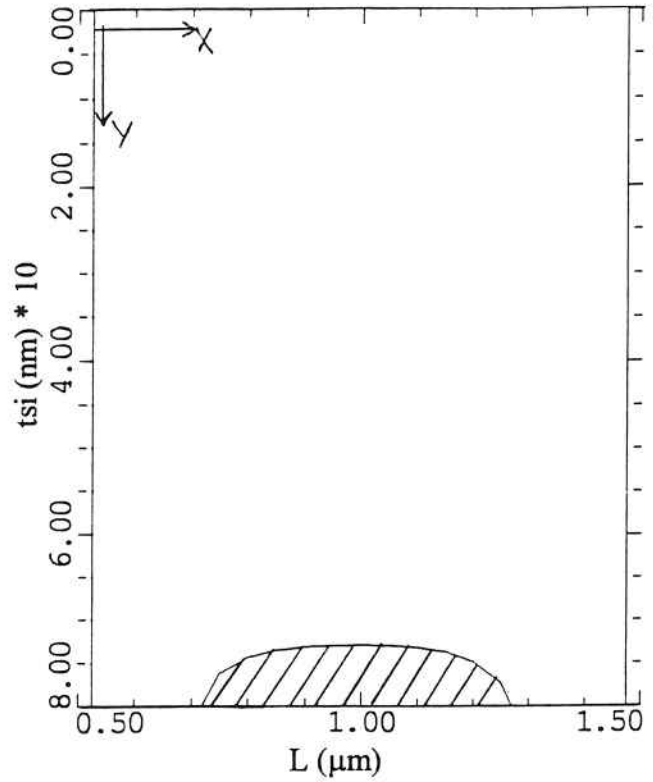
It is worth noting that the transition region exists even for $N_{itf}=0$ and $N_{itb}=0$.

To study this transition region it was observed by simulation the channel depletion depth at the points $V_{gb}=-6V$ and $V_{gf}=0,2$; $0,3$; $0,4$ and $0,45V$ which is shown in figure 7. It can be seen that the back interface is not depleted from source to drain. Therefore the simple available models (equations 8 and 9) can not be used anymore. An specific model must be developed to be used in this region.

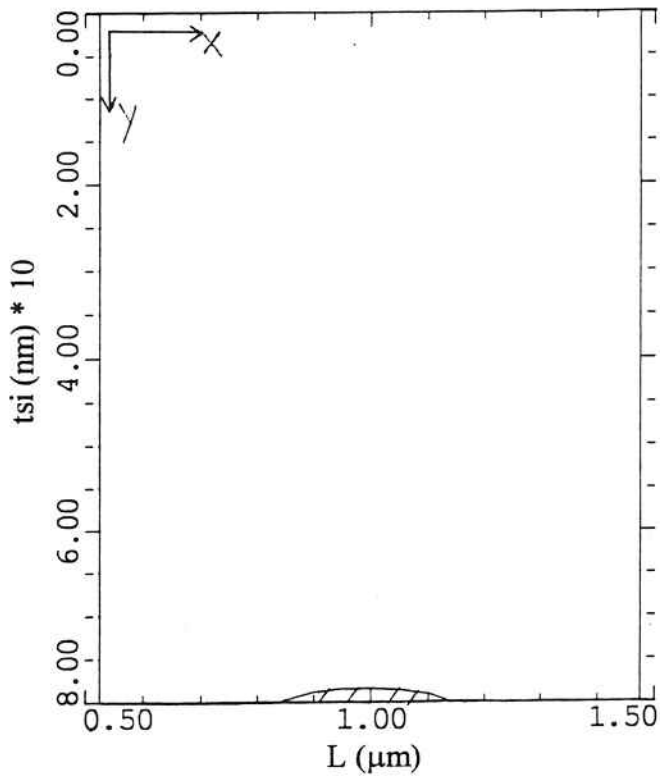
Depletion Region : $V_{gf}=0,2 \text{ V}$; $V_{gb}=-6\text{V}$



Depletion Region : $V_{gf}=0,3 \text{ V}$; $V_{gb}=-6\text{V}$



Depletion Region : $V_{gf}=0,4 \text{ V}$; $V_{gb}=-6\text{V}$



Depletion Region : $V_{gf}=0,45 \text{ V}$; $V_{gb}=-6\text{V}$

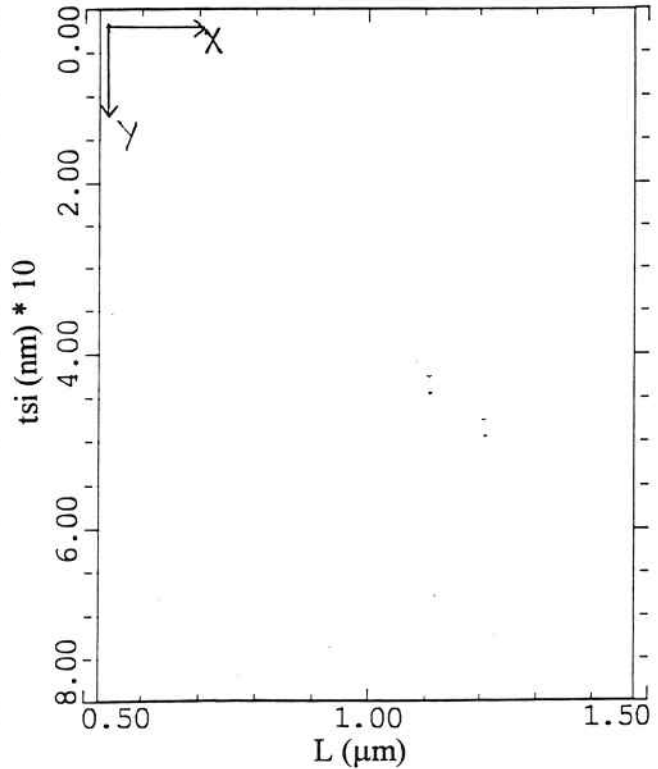


Figure 8 - Simulated channel region including the depletion depth for $V_{gb} = -6\text{V}$ and $V_{gf}=0,2$; $0,3$; $0,4$; $0,45\text{V}$. The x axis is the channel length and the y axis is the silicon film thickness as shown in figure 1. The Region neutral is shded.

5 - CONCLUSIONS

In this work was studied experimentally and by simulation a non-abrupt transition region in the subthreshold Slope.

This transient region occurs because the back interface is not depleted from source to drain and not due to the variation of interface trap density at back interface as reported before.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank IMEC for supplying the devices.

REFERENCES

- [1]- J.P. Colinge ; "Silicon On Insulator Technology: Materials to VLSI", Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [2]- S.C. Witczak ; J.S. Suehle ; Solid State Electronics ; Vol. 35; pp. 345 ; 1992.
- [3]- F.Balestra ; M.Benachir ; J.Brini and G.Ghibaudo ; IEEE Trans. Electron Devices ; Vol. 37 ; pp. 2003 ; 1990.
- [4]- D.C. Mayer ; R.C. Cole ; IEDM 91 ; pp. 329.
- [5]- D.J. Wouters ; J.P. Colinge ; H.E. Maes ; Vol. 37; pp. 2022; 1990.
- [6]- S.M. Sze ; Physics of Semiconductor Devices New York; Wiley, 1981.
- [7]- H.K. Lim ; J.G. Fossum ; IEEE Trans. Electron Devices, Vol ED30 ; pp. 1244 ; 1983.
- [8]- F. Assaderaghi ; J. Chen ; R. Solomon ; T. Yi-Chan ; P.K. Ko ; C. Hu ; IEEE Electron Devices Letters ; Vol 10 ; pp. 518 ; 1991.
- [9]- J.A. Martino ; E.Simoen ; C.Claeys ; Vol 38 ; pp. 1799 ; 1995.
- [10]- A. Terao ; D.Frandre ; E.Cora-Tomayo ; F. Van de Wiele ; IEEE Electron Devices Letters ; Vol 12 ; pp. 682 ; 1991.

- BT/PEE/9301 - Oscilador a HEMT - 10 GHz - FÁTIMA S. CORRERA, EDMAR CAMARGO
- BT/PEE/9302 - Representação Senoidal da Voz através dos Polos do Filtro Preditor - MARCELO B. JOAQUIM, NORMONDS ALENS
- BT/PEE/9303 - Blindagens por Grades Condutoras: Cálculo do Campo Próximo - LUIZ CEZAR TRINTINALIA, ANTONIO ROBERTO PANICALI
- BT/PEE/9402 - Sistema de Otimização e Controle de Produção em Minas de Pequeno e Médio Porte - TSEN CHUNG KANG, VITOR MARQUES PINTO LEITE
- BT/PEE/9401 - Determinação das Frases de Aplicação Forense para o projeto NESPER e Tese de Mestrado IME/94, com Base em Estudos Fonéticos - MARCONI DOS REIS BEZERRA, EUVALDO F. CABRAL JUNIOR
- BT/PEE/9402 - Implementação e Teste de uma Rede Neural Artificial do Tipo KSON (Kohonen Self-Organizing Network) com Entradas Bidimensionais - MARCELO YASSUNORI MATUDA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9403 - Transformada de Walsh e Haar Aplicadas no Processamento de Voz - ALEXANDRE AUGUSTO OTTATI NOGUEIRA, THIAGO ANTONIO GRANDI DE TOLOSA, EUVALDO F. CABRAL JÚNIOR
- BT/PEE/9404 - Aplicação de Redes Neurais ao Problema de Reconhecimento de Padrões por um Sonar Ativo - ALEXANDRE RIBEIRO MORRONE, CRISTINA COELHO DE ABREU, EDUARDO KOITI KIUKAWA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9405 - Tudo que se Precisa Saber sobre a Prática da FFT - Transformada Rápida de Fourier (Inclui Software) - ROGÉRIO CASAGRANDE, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9406 - A Survey on Speech Enhancement Techniques of Interest to Speaker Recognition - CELSO S. KURASHIMA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9407 - Identificação de Pulsos Decádicos em Linhas Telefônicas - ANTONIO P. TIMOSZCZUK, MÁRCIO A. MATHIAS, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9408 - Implementação e Teste de Filtros do Tipo Adaptativo e "Notch" para a Remoção de Interferência de 60 Hz em Sinais de Eletrocardiograma - FLÁVIO ANTÔNIO MENEGOLA, JOSÉ AUGUSTO DE MATTOS, JOSÉ GOMES G. FILHO, SIDNEY SILVA VIANA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9409 - Compressão de Sinais de Voz utilizando Transformadas de Karhunen-Loève, Fourier e Hadamard - IVAN LUIS VIEIRA, LUIZ FERNANDO STEIN WETZEL, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9410 - "Ray Tracing" Paralelo - EDUARDO TOLEDO SANTOS, JOÃO ANTONIO ZUFFO
- BT/PEE/9411 - Implementação de uma Ferramenta Posicionador para "Gate-Arrays" Tipo Mar de Portas - JORGE W. PERLAZA PRADO, WILHELMUS A. M. VAN NOIJE
- BT/PEE/9412 - Tudo que se Precisa Saber Sobre a Teoria da FFT - Transformada Rápida de Fourier - FÁBIO LUÍS ROMÃO, REINALDO SILVEIRA, ROGÉRIO CASAGRANDE, EUVALDO CABRAL JR.
- BT/PEE/9413 - Análise do Ruído Sonoro em uma Sala de Aquisição de Amostras de Som com Microcomputador - FÁBIO LUÍS ROMÃO, REINALDO SILVEIRA, EUVALDO CABRAL JR.
- BT/PEE/9414 - Cor: Aspectos Relevantes para Visualização de Dados - SÍLVIA DELGADO OLABARRIAGA
- BT/PEE/9415 - Projeto de Filtros Digitais IIR com Fase Aproximadamente Linear Utilizando Redução de Ordem - IVAN F. J. RODRIGUES, MAX GERKEN
- BT/PEE/9416 - GERAFILTRO: Sistema para Projeto Automático de Filtros Digitais "IIR" (da especificação em alto nível ao leiaute do "ASIC") - RICARDO PIRES, JOSÉ VIEIRA DO VALE NETO
- BT/PEE/9417 - Redes Neurais Artificiais Aplicadas à Identificação de Pulsos Decádicos em Linhas Telefônicas - ANTONIO P. TIMOSZCZUK, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9501 - Estudo Comparativo de Métodos de Cálculo da Frequência Fundamental - MARCOS COSTA HUNOLD, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9502 - Combinando Técnicas de Redes Neurais Artificiais e Informações de Excitação no Reconhecimento Automático do Locutor - ANDRÉ BORDIN MAGNI, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9503 - Utilização de Redes Neurais Artificiais para Detecção e Identificação de Falhas em Circuitos - MÁRCIO YUKIO TERUYA, ROBERTO AMILTON BERNARDES SÓRIA, EUVALDO CABRAL JR.
- BT/PEE/9504 - Uso de Redes Neurais Artificiais no Reconhecimento de Locutores no Domínio Temporal - BENEDITO JOSÉ BARRETO FONSECA JÚNIOR, EUVALDO CABRAL JÚNIOR
- BT/PEE/9505 - Projeto de Filtros Passivos e Ativos em Técnicas de Circuitos Integrados de Microondas - DAVID VIVEIROS JÚNIOR, DENISE CONSONNI
- BT/PEE/9506 - Uma Análise de *Clustering* para as Frases de Projeto NESPER - RONALDO OLIVEIRA MESSINA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9507 - Controle com Estrutura Variável e Modos Deslizantes - Um Estudo para Aplicação em Controle Carga-frequência da Geração - JOSE PAULO F. GARCIA, JOCELYN FREITAS BENNATON
- BT/PEE/9508 - Recuperação das Margens de Ganho e de Fase para Sistemas de Fase Não Mínima por Realimentação da Saída - MARCO H. TERRA, VITOR M. P. LEITE
- BT/PEE/9509 - Sistema de Inspeção Óptica de Dispositivos Bi-Dimensionais - CASIMIRO DE ALMEIDA BARRETO, PEDRO LUÍS PRÓSPERO SANCHEZ
- T/PEE/9510 - Sistema de Partículas Uma Poderosa Técnica de Animação em Computação Gráfica - RENATO CURTO RODRIGUES, JOÃO ANTÔNIO ZUFFO
- BT/PEE/9511 - Efeito de Ruídos em Sinais de Voz Visualizados em Trajetórias Neurais de Kohonen - CELSO S. KURASHIMA, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9601 - "Um Reconhecedor de Sinais Sonoros Utilizando LVQ" - ALEXANDRE TORNICE, EUVALDO CABRAL JR.
- BT/PEE/9602 - "Coleção Artificial Neural Networks: Uma Visão Geral dos Sistemas Neurais Artificiais de Stephen Grossberg" - CHIU HSIUNG HUANG
- BT/PEE/9603 - "Reactively-Sputtered TiN Formation Using a RF Magnetron System"- SÉRGIO PAULO AMARAL OSÓRIO, LUIZ SÉRGIO ZASNICOFF
- BT/PEE/9604 - Aspectos em Tradução de Linguagens Naturais Através de Redes Neurais Artificiais - CARLOS EDUARDO DANTAS DE MENEZES, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PEE/9605 - Implementação de Blocos Passa-Tudo Utilizando Realimentação de Erro - SÉRGIO JOSÉ CARNEIRO LEÃO, MAX GERKEN
- BT/PEE/9606 - Coleção SANN group Redes Neurais Artificiais: A Rede Neural de Sakoe - ANDRÉ BORDIN MAGNI, EUVALDO F. CABRAL JR.

BT/PEE/9607 - Coleção SANN group Redes Neurais Artificiais: A Rede Neural de Steinbuch - ROBERTO AMILTON BERNARDES SÓRIA, EUVALDO F. CABRAL JR.

BT/PEE/9608 - Desenvolvimento de uma Estrutura de Duplo Nível de Metal para a Confeção de Interconexões em Circuitos Integrados - JOSÉ AUGUSTO DE ALENCAR PEREIRA, LUIZ CARLOS MOLINA TORRES

BT/PEE/9609 - Determinação de Parâmetros de Processo para Fotomáscara "Balzers" Utilizando Gerador de Padrões - JORGE SEKI, MEGUMI SAITO

BT/PEE/9610 - Um Ambiente para Desenvolvimento de Sistemas Distribuídos - PEDRO F. ROSA, JOÃO A. ZUFFO

BT/PEE/9611 - Interpretações Teóricas do Funcionamento Cerebelar: Uma Revisão - MARCUS FRAGA VIEIRA, ANDRÉ FÁBIO KOHN

BT/PEE/9612 - Marcapasso Cardíaco Temporário Microcontrolado de Demanda e Baixo Consumo - FLAVIO ANTONIO MENEGOLA, JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DE BARROS MORAES

BT/PEE/9613 - Um Sistema de Planejamento de Ação Baseado em Casos para uma Célula Flexível de Manufatura - RICARDO LUÍS DE FREITAS, MÁRCIO RILLO

BT/PEE/9614 - Aplicações do Boundary-Scan para o Teste de Módulos Multichip - ROBERTO C. COSSI JR., JOSÉ ROBERTO DE A. AMAZONAS

BT/PEE/9615 - A 2.488 Gb/s GaAs 1:4/1:16 Demultiplexer IC with Skip Circuit for Sonet STS-12/48 Systems - TAUFIK ABRÃO, FATIMA S. CORRERA

BT/PEE/9616 - Uma Contribuição para a Construção de Algoritmos em Projetos de Redes - ALLAN DE SOUZA, JOSÉ ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA

BT/PEE/9617 - Análise Crítica dos Métodos de Medição do Intervalo QT do Eletrocardiograma - SÍDNEY DA SILVA VIANA, JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DE BARROS MORAES

BT/PEE/9618 - Deposição e Caracterização de Filmes de SiO₂ Crescidos pela Técnica de PECVD a Baixa Temperatura - MARCO ALAYO CHÁVEZ, INÉS PEREYRA

BT/PEE/9619 - PARSTOOL: Uma Ferramenta de Auxílio à Simulação de Sistemas Paralelos - LI KUAN CHING, LIRIA MATSUMOTO SATO

BT/PEE/9620 - Análise de um Método de Otimização por Malha no Treinamento de Robôs - OLÍMPIO MURILO CAPELI, JOSÉ CARLOS T. B. MORAES, SADA O ISOTANI

BT/PEE/9701 - Identification of Unstable Mechanical Systems - ROBERTO MOURA SALES, ANSELMO BITTAR, MICHAEL PORSCHE, LAÉRCIO LUCCHESI

