

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI
RENAN TREVISOLI DORIA

**EFEITO DA TENSÃO MECÂNICA EM TRANSISTORES DE
MÚLTIPLAS PORTAS OPERANDO EM TEMPERATURAS
CRIOGÊNICAS**

São Bernardo do Campo

2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

RENAN TREVISOLI DORIA

**EFEITO DA TENSÃO MECÂNICA EM TRANSISTORES DE
MÚLTIPLAS PORTAS OPERANDO EM TEMPERATURAS
CRIOGÊNICAS**

Dissertação apresentada ao Centro Universitário da FEI como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Antonio Pavanello

São Bernardo do Campo

2010

Doria, Renan Trevisoli

Efeito da tensão mecânica em transistores de múltiplas portas operando em temperaturas criogênicas / Renan Trevisoli Doria. São Bernardo do Campo, 2010.

145 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Antonio Pavanello

1. Múltiplas Portas. 2. Temperaturas Criogênicas. 3. Tensão Mecânica. I. Pavanello, Marcelo Antonio, orient. II. Título.

CDU 621.381

Dedico este trabalho aos meus pais Sonali e Francisco e ao meu irmão Rodrigo por todo o incentivo, dedicação e carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Antonio Pavanello pela contribuição, incentivo e confiança ao longo do trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro durante os dois anos de mestrado.

Ao IMEC, ao Prof. Dr. João Antonio Martino, ao Prof. Dr. Cor Claeys e ao Dr. Eddy Simoen por terem fornecido os dispositivos.

Aos professores Dr. Sebastião Gomes dos Santos Filho e Dr. Aparecido Sirley Nicolett pelos conselhos advindos da defesa de mestrado.

Aos professores Dr. Renato Camargo Giacomini e Dra. Michelly de Souza pelas contribuições ao longo do trabalho, especialmente pelos conselhos advindos da qualificação.

Aos meus pais pelo incentivo, pelo carinho e pelas contribuições ao longo desses dois anos.

Ao meu irmão pelo incentivo, carinho e por toda a contribuição na parte técnica especialmente pelas revisões do trabalho.

Aos demais professores do mestrado Dr. Salvador Pinillos Gimenez e Dr. Marcello Bellodi pelos conhecimentos advindos das aulas.

Aos colegas do mestrado Márcio e Felipe pela convivência e pelas contribuições no que se refere à utilização do simulador.

Aos demais colegas de mestrado Ingrid, Eduardo, Klaus, Rudolf, Jorge e Agnaldo pela convivência.

Aos meus avós Anna e Adão que sempre me incentivaram e sempre acreditaram em mim.

À Adriana e ao Ricardo, responsáveis pela secretaria de mestrado, que sempre procuraram resolver os problemas enfrentados ao longo do curso.

Aos que foram involuntariamente esquecidos mas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Doria, R. T. **Efeito da Tensão Mecânica em Transistores de Múltiplas Portas Operando em Temperaturas Criogênicas**. 2010. 145 f., Dissertação (Mestrado) – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2010

Neste trabalho é apresentado um estudo dos transistores de múltiplas portas considerando as influências da temperatura e da tensão mecânica. Os transistores de múltiplas portas demonstram grandes vantagens em relação ao convencional devido ao maior controle sobre as cargas no canal, melhorando a performance dos dispositivos com dimensões submicrométricas, com comprimento de canal inferiores a 45 nm. A influência da baixa temperatura é conhecida principalmente por aumentar a mobilidade dos portadores. Logo, a utilização de um dispositivo de múltiplas portas em baixa temperatura é interessante devido à soma dos efeitos benéficos de ambas as parcelas. A aplicação de tensão mecânica tem sido usada atualmente como forma de aumentar a mobilidade dos portadores, uma vez que esta deforma a estrutura cristalina do silício. Tal artifício tem sido utilizado como alternativa à crescente degradação da mobilidade devido à miniaturização dos dispositivos. Inicialmente, foi analisada detalhadamente a tensão de limiar dos dispositivos sem a presença de tensão mecânica considerando a influência da temperatura. Os transistores utilizados apresentam concentração de dopantes natural da lâmina, fazendo com que a definição de tensão de limiar comumente aplicada à dispositivos convencionais não seja a mais adequada. Assim, foi realizada uma análise detalhada da condição de limiar destes dispositivos, mostrando que uma outra definição de tensão de limiar baseada na física do dispositivo, considerando as componentes da corrente, apresenta resultados mais satisfatórios. A tensão mecânica foi analisada, principalmente, através de dois parâmetros importantes sendo a tensão de limiar e a transcondutância. A não uniformidade da tensão mecânica face às dimensões dos dispositivos foi observada experimentalmente e reproduzida por simulação. Foram também analisadas as influências da temperatura e da tensão mecânica em conjunto especialmente sobre a tensão de limiar. Todo o trabalho foi desenvolvido utilizando-se dois simuladores numéricos tridimensionais, medidas experimentais dos dispositivos, além de comparações com modelos analíticos.

Palavras-chave: múltiplas portas, temperaturas criogênicas, tensão mecânica

ABSTRACT

Doria, R. T. **Study of the Stress Effects in Multiple Gate Transistors Operating in Cryogenics Temperatures.** 2010. 145 p., Dissertation (Master) – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2010.

In this work, a study of the multiple gate transistors considering the influences of the temperature and of the stress has been presented. Multiple gate transistors exhibit advantages over the conventional one due to higher control on the charges at the channel of the device, improving the performance of submicrometer transistor, with channel length shorter than 45 nm. The low temperature influence is studied, mainly, for its capability of increasing the carriers' mobility. Therefore, the operation of a multiple gate transistor in cryogenics temperature is interesting owing to the sum of the benefits from both components. Stress has been lately used as an option to rise the carries' mobility, since it changes the crystalline structure of the silicon. It has been used as an alternative to the mobility degradation due to the devices miniaturization. Initially, the threshold voltage in the devices without stress has been analyzed considering the influence of the temperature. The devices studied present the natural doping concentration of the silicon substrate. As a result, the classical definition of the threshold voltage, which is usually applied to conventional ones, is not the most adequate. Consequently, a detailed analysis on the threshold of these devices was performed, showing that another definition based on the transistor physics, in which the current components are taken into consideration, presents better results. Stress effects were analyzed through two main parameters: the threshold voltage and the transconductance. The non-uniformity of the strain when considering the dimensions of the devices was observed experimentally and reproduced in the simulations. The influence of the temperature was analyzed together with the effects of the stress, especially in the threshold voltage. The whole work was developed using two tridimensional numeric simulators and through the devices experimental measurement, comparing also to analytical models.

Keywords: multiple gate, cryogenics temperatures, strained transistors.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Representação esquemática de um dispositivo porta tripla..... | 30 |
| Figura 2.2 – Estrutura multi- <i>fin</i> s..... | 30 |
| Figura 2.3 – Exemplo de extração da tensão de limiar utilizando o método da razão de g_m/I_D . .. | 38 |
| Figura 2.4 – Curva da tensão de limiar em função de W_{Fin} obtida da equação (2.26), enfatizando a influência do termo associado à solução da equação de Schrödinger..... | 40 |
| Figura 2.5 – Variação da concentração intrínseca de portadores e da largura de faixa proibida do silício em função da temperatura. | 41 |
| Figura 2.6 – Variação do potencial de Fermi e da porcentagem de impurezas ionizadas com a temperatura para diversas concentrações de dopantes..... | 43 |
| Figura 2.7 – Curva das componentes que compõe a mobilidade independente de campo em função da temperatura [55]. | 48 |
| Figura 2.8 – Mobilidade independente de campo <i>versus</i> temperatura para diversas concentrações de dopantes [55]. | 48 |
| Figura 2.9 – Diagrama esquemático da geração de tensão uniaxial..... | 52 |
| Figura 2.10 – Formação da tensão mecânica biaxial através da utilização de ligas SiGe. | 53 |
| Figura 2.11 – SSDOI (<i>Strained Silicon Directly on Insulator</i>)..... | 55 |
| Figura 2.12 – Representação das componentes da tensão mecânica. | 56 |
| Figura 2.13 – Ilustração das componentes σ_{yy} (A) e σ_{xy} (B) da tensão mecânica. | 57 |
| Figura 2.14 – Variação da tensão mecânica na direção da largura de uma ilha de silício em uma distribuição 2D (A) e em uma distribuição 1D à 1 nm abaixo do óxido de porta (B) de acordo com a ref. [74]. | 59 |
| Figura 2.15 – Efeito da aplicação de tensão mecânica na banda de condução do silício..... | 60 |
| Figura 3.1 – Divisão do <i>fin</i> considerando mobilidades diferentes entre as superfícies laterais e superior..... | 68 |
| Figura 4.1 – Densidade de elétrons na direção da largura do <i>fin</i> em diversas profundidades. | 70 |
| Figura 4.2 – Potencial eletrostático na direção da largura do <i>fin</i> em diversas profundidades. | 71 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.3 – Corrente de dreno (A) e corrente de dreno em escala logarítmica (B) em função da tensão de porta em um dispositivo com W_{Fin} de 20 nm para diversas temperaturas na faixa entre 100 K e 400 K. | 72 |
| Figura 4.4 – Transcondutância <i>versus</i> tensão de porta em um dispositivo com W_{Fin} de 20 nm para diversas temperaturas na faixa entre 100 K e 400 K..... | 73 |
| Figura 4.5 – Inclinação de sublimiar em função da temperatura para várias larguras de <i>fin</i> juntamente com o valor mínimo teórico. | 74 |
| Figura 4.6 – Corrente de dreno em função de tensão de porta (y esquerdo) e razão g_m/I_D em função de V_G (y direito) considerando a mobilidade constante..... | 76 |
| Figura 4.7 - Corrente de dreno em função de tensão de porta (y esquerdo) e razão g_m/I_D em função de V_G (y direito) considerando os modelos descritos no item 3.1.1. | 76 |
| Figura 4.8 – Tensão de limiar <i>versus</i> “T” com $W_{Fin} = 20$ nm gerados por simulação Atlas..... | 77 |
| Figura 4.9 – Diferença entre os potenciais extraídos na fonte na condição de limiar e com polarização nula na porta em função da temperatura..... | 78 |
| Figura 4.10 – Comparação entre a equação (2.26) e a sua expansão em série (equação (4.10)).. | 81 |
| Figura 4.11 – Tensão de limiar <i>versus</i> largura do <i>fin</i> em temperatura ambiente obtidas por simulação Atlas. | 83 |
| Figura 4.12 – Variação da tensão de limiar com W_{Fin} | 84 |
| Figura 4.13 – Tensão de limiar <i>versus</i> largura do <i>fin</i> em “T” = 100 K. | 84 |
| Figura 4.14 – Corrente de dreno em função da tensão de porta nos dispositivos medidos com $W_{Fin} = 20$ nm e $L_{Fin} = 90$ nm para $V_{DS} = 0,1$ V e 1,1 V..... | 86 |
| Figura 4.15 – V_{TH} <i>versus</i> “T” em dispositivos medidos com W_{Fin} de 20 nm e L_{Fin} de 90 nm. | 87 |
| Figura 4.16 – Variação de V_{TH} por “T” para um dispositivo com W_{Fin} de 20 nm em simulação <i>Sentaurus Device</i> | 88 |
| Figura 4.17 – Efeito da redução do comprimento de canal em V_{TH} | 89 |
| Figura 4.18 – Concentração de elétrons na direção da largura do <i>fin</i> utilizando o modelo clássico e o quântico para dispositivos com W_{Fin} de 5 nm (A), 10 nm (B), 15 nm (C) e 30 nm (D). | 90 |
| Figura 4.19 – Tensão de limiar obtida em função de W_{Fin} considerando efeitos quânticos. | 91 |
| Figura 4.20 – Tensão de limiar em função de W_{Fin} comparando-se os métodos de extração de V_{TH} na presença de efeitos quânticos..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.21 – Variação da tensão de limiar com a temperatura para um dispositivo com W_{Fin} de 5 nm..... | 92 |
| Figura 4.22 – Efeito da aplicação de tensão mecânica na transcondutância máxima dos dispositivos..... | 93 |
| Figura 4.23 – Aumento percentual de $g_{m,max}$ com a aplicação de tensão mecânica nos dispositivos medidos. | 94 |
| Figura 4.24 – Alteração em V_{TH} devido à aplicação de tensão mecânica em função da largura do <i>fin</i> | 95 |
| Figura 4.25 – Aumento percentual da transcondutância em função de W_{Fin} | 96 |
| Figura 4.26 – Variação de V_{TH} com W_{Fin} nos dispositivos simulados com e sem efeito da tensão mecânica..... | 96 |
| Figura 4.27 – Variação da tensão mecânica em função da deformação no eixo da largura do <i>fin</i> | 98 |
| Figura 4.28 – Diagrama esquemático da aplicação da tensão mecânica através da função de Boltzmann para um dispositivo largo. | 99 |
| Figura 4.29 – Tensão mecânica σ_{xx} obtida através da aproximação pela equação de Boltzmann (equações (4.10a e 4.11a)). | 100 |
| Figura 4.30 – Distribuição da tensão mecânica σ_{xx} em um dispositivo com $W_{Fin} = 100$ nm. | 101 |
| Figura 4.31 – Componentes σ_{xx} (A) e σ_{yy} (B) da tensão mecânica na direção da largura do <i>fin</i> normalizado pela largura do mesmo para dispositivos com W_{Fin} variando entre 20 nm e 300 nm..... | 102 |
| Figura 4.32 – Divisão do <i>fin</i> para a definição de deformação nas direções da largura e do comprimento do mesmo..... | 103 |
| Figura 4.33 – Corrente de dreno em função da tensão aplicada à porta em um dispositivo com $W_{Fin} = 20$ nm, com e sem a presença de tensão mecânica, para diversas temperaturas. | 104 |
| Figura 4.34 – Transcondutância normalizada pela largura total do dispositivo em função da sobretensão de porta..... | 105 |
| Figura 4.35 - Aumento percentual de $g_{m,max}$ com a aplicação de tensão mecânica nos dispositivos simulados com aplicação da tensão mecânica não-uniforme..... | 106 |
| Figura 4.36 – Aumento percentual de $g_{m,max}$ em função do comprimento de canal. | 106 |
| Figura 4.37 - Transcondutância normalizada pela largura total do dispositivo em função da sobretensão de porta obtida experimentalmente. | 107 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.38 – Aumento percentual de $g_{m,max}$ em função do comprimento do canal em dispositivos medidos [73] em comparação com o resultado simulado da Figura 4.36. | 108 |
| Figura 4.39 - Alteração em V_{TH} devido à aplicação de tensão mecânica não uniforme em função da largura do <i>fin</i> nos dispositivos simulados. | 109 |
| Figura 4.40 – Tensão de limiar em função da temperatura para um dispositivo simulado de $W_{Fin} = L_{Fin} = 1 \mu m$ com e sem a aplicação de tensão mecânica. | 110 |
| Figura 4.41 – Variação dV_{TH}/dT em função da largura W_{Fin} para um dispositivo simulado de $L_{Fin} = 1 \mu m$ com e sem a presença de tensão mecânica. | 111 |
| Figura 4.42 – Tensão de limiar em função da temperatura para um dispositivo com $W_{Fin} = 20 nm$ e $L_{Fin} = 1 \mu m$ considerando algumas combinações de modelos dos efeitos causados pela aplicação de tensão mecânica. | 112 |
| Figura 4.43 – Transcondutância máxima <i>versus</i> temperatura para um dispositivo de $W_{Fin} = 20 nm$ e $L = 1 \mu m$ com e sem a presença de tensão mecânica e aumento percentual de $g_{m,max}$ <i>versus</i> a temperatura..... | 114 |
| Figura 4.44 – Aumento percentual de $g_{m,max}$ em função da temperatura para diversas larguras de <i>fin</i> | 115 |
| Figura 4.45 – Aumento percentual de $g_{m,max}$ em função de W_{Fin} para diversas temperaturas.... | 115 |
| Figura 4.46 – Inclinação de sublimiar em função da temperatura para dispositivos com e sem a presença de tensão mecânica..... | 116 |
| Figura 4.47 - Inclinação de sublimiar em função da temperatura para um dispositivo medido com e sem a presença de tensão mecânica..... | 117 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 3.1 – Parâmetros do modelo CVT modificados | 67 |
| Tabela 3.2 – Parâmetros alterados no modelo Lombardi para a degradação da mobilidade dos elétrons. | 68 |
| Tabela 4.1 – Tensão de limiar, inclinação de sublimiar e transcondutância máxima extraídas para um dispositivo com $W_{Fin} = 20$ nm, $L_{Fin} = 910$ nm e $V_{DS} = 50$ mV em diversas temperaturas. | 73 |
| Tabela 4.2 – Variação de V_{TH} com “T” para diferentes larguras de <i>fin</i> | 82 |
| Tabela 4.3 – DIBL extraído para os dispositivos medidos | 86 |
| Tabela 4.4 – Variação dV_{TH}/dT e redução percentual desta variação obtidas dos dados da Figura 4.40. | 110 |
| Tabela 4.5 – Variação dV_{TH}/dT obtida pela Figura 4.42 para as diferentes combinações de modelos relacionados aos efeitos da tensão mecânica. | 112 |
| Tabela 4.6 – Variação dV_{TH}/dT e redução percentual desta variação obtidas para os dispositivos medidos com e sem a presença de tensão mecânica. | 113 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------------|--|
| a | Ponto central através do qual a série de Taylor é desenvolvida. |
| a_{filme} | Espaçamento cristalino do filme [nm] |
| a_{sub} | Espaçamento cristalino do substrato [nm] |
| A_1 | Parâmetro utilizado na equação de Boltzmann que representa a assíntota horizontal do início da curva |
| A_2 | Parâmetro utilizado na equação de Boltzmann que representa a assíntota horizontal do final da curva |
| C_{ox} | Capacitância do óxido de porta por unidade de área [F/cm^2] |
| C_{oxb} | Capacitância do óxido de porta da segunda interface por unidade de área [F/cm^2] |
| C_{oxf} | Capacitância do óxido de porta da primeira interface por unidade de área [F/cm^2] |
| C_{Si} | Capacitância do silício por unidade de área [F/cm^2] |
| dx | Parâmetro utilizado na equação de Boltzmann que representa a inclinação no centro da curva |
| E | Módulo de Young ou módulo de elasticidade [Pa] |
| E_A | Nível de energia das impurezas aceitadoras [eV] |
| E_{eff} | Campo elétrico efetivo [V/cm] |
| E_D | Nível de energia das impurezas doadoras [eV] |
| E_{Fn} | Nível de Fermi para elétrons [eV] |
| E_{Fp} | Nível de Fermi para lacunas [eV] |
| E_G | Largura da faixa da banda proibida [eV] |
| F | Matriz das constantes elásticas de flexibilidade [cm^2/dina] |
| F_n | Nível de quase-Fermi dos elétrons [eV] |
| g_m | Transcondutância do dispositivo [S] |
| $g_{m,\text{max}}$ | Transcondutância máxima do dispositivo [S] |
| h | Constante de Planck [$6,626 \times 10^{-34}$ J.s] |
| \hbar | Constante de Planck normalizada [$1,055 \times 10^{-34}$ J.s] |
| H_{Fin} | Altura do <i>fin</i> [nm] |
| I_D | Corrente de dreno [A] |
| I_{D0} | Corrente de dreno de um dispositivo planar de porta simples [A] |

| | |
|------------|--|
| k | Constante de Boltzmann [$1,38 \times 10^{-23}$ J/K] |
| L_{Di} | Comprimento intrínseco de Debye [cm] |
| L_{Fin} | Comprimento de canal de um dispositivo FinFET [μm] |
| m_0 | Massa do elétron [$9,11 \times 10^{-31}$ kg] |
| m^* | Massa efetiva dos portadores |
| m^* | Massa de confinamento do portador na direção transversal [kg] |
| m_e^* | Massa efetiva dos elétrons |
| m_{nl} | Massa longitudinal dos elétrons em um sub-vale de energia |
| m_{nt} | Massa transversal dos elétrons em um sub-vale de energia |
| n | Fator de corpo do transistor |
| n_i | Concentração intrínseca do silício [cm^{-3}] |
| N_A | Concentração de impurezas aceitadoras [cm^{-3}] |
| N_A^- | Concentração de impurezas aceitadoras ionizadas [cm^{-3}] |
| N_C | Densidade de estados da banda de condução [cm^{-3}] |
| N_D | Concentração de impurezas doadoras [cm^{-3}] |
| N_D^+ | Concentração de impurezas doadoras ionizadas [cm^{-3}] |
| N_V | Densidade de estados da banda de valência [cm^{-3}] |
| N_{it} | Densidade de armadilhas de interface por unidade de área [F/cm^2] |
| P | Período de uma estrutura multi- <i>fin</i> s [nm] |
| R | Matriz das constantes elásticas de rigidez [dina/cm^2] |
| q | Carga elementar do elétron [$1,6 \times 10^{-19}$ C] |
| Q_{depl} | Densidade de cargas de depleção por unidade de área [C/cm^2] |
| Q_e^* | Metade da densidade de cargas móveis em um dispositivo porta dupla [C/cm^2] |
| Q_{ox} | Densidade de cargas fixa no óxido por unidade de área no MOS convencional [C/cm^2] |
| Q_{oxf} | Densidade de cargas fixa no óxido da primeira interface por unidade de área no MOS SOI totalmente depletado [C/cm^2] |
| R_0 | Resistência inicial do material [Ω] |
| S | Inclinação de sublimiar [mV/década] |
| t_{box} | Espessura da camada de óxido enterrado [cm] |
| t_{ox} | Espessura da camada de óxido de porta [cm] |
| t_{Si} | Espessura da camada de silício [cm] |

| | |
|-----------------|---|
| T | Temperatura absoluta [K] |
| V_C | Tensão ao longo do canal do dispositivo [V] |
| V_D | Tensão aplicada ao dreno do dispositivo [V] |
| V_{DS} | Tensão aplicada entre o dreno e a fonte [V] |
| V_{FB} | Tensão de faixa plana [V] |
| V_G | Tensão aplicada à porta [V] |
| V_{GB} | Tensão aplicada ao substrato [V] |
| $V_{GB,accB}$ | Tensão aplicada ao substrato para que a segunda interface fique em acumulação [V] |
| V_{GS} | Tensão aplicada entre a porta e a fonte [V] |
| V_{GT} | Sobretensão de porta [V] |
| $V_{thf,accB}$ | Tensão de limiar em um dispositivo SOI totalmente depletado com a segunda interface em acumulação [V] |
| $V_{thf,deplB}$ | Tensão de limiar em um dispositivo SOI totalmente depletado com a segunda interface em depleção [V] |
| $V_{thf,invB}$ | Tensão de limiar em um dispositivo SOI totalmente depletado com a segunda interface em inversão [V] |
| V_{TH} | Tensão de limiar [V] |
| W | Largura do canal [nm] |
| W_{Fin} | Largura do <i>fin</i> [nm] |
| W_t | Largura total de um <i>fin</i> considerada como a soma das larguras das portas superior e laterais [nm] |
| x | Concentração de germânio na liga silício/germânio |
| x_{dmax} | Espessura máxima da camada de depleção [cm] |
| x_0 | Parâmetro utilizado na equação de Boltzmann que representa o centro da curva |
| y | Distância ao longo do eixo do canal [cm] |
| α | Fator utilizado para o cálculo da corrente de dreno de transistores nMOSFET que assume valor “1” para dispositivo planar e “2” para dispositivo porta dupla simétrico |
| α_f | Coeficiente de dilatação térmica do filme [K ⁻¹] |

| | |
|--------------------|--|
| α_p | Diferença entre os potenciais de superfície e centro normalizada pelo potencial térmico |
| α_s | Coefficiente de dilatação térmica do substrato [K^{-1}] |
| α_S | Coefficiente de espalhamento [cm/V] |
| α_{vt} | Parâmetro utilizado no cálculo da variação da tensão de limiar pela temperatura que pode assumir valor “0” ou “1” para o SOI totalmente depletado ou MOS convencional, respectivamente |
| β | Variável auxiliar relacionada com a densidade de carga |
| γ | Módulo de elasticidade transversal [Pa] |
| ΔE_c | Alteração na banda de condução induzida pela aplicação de tensão mecânica [eV] |
| $\Delta E_{C,i}$ | Termo adicional relacionando a deformação ao nível da energia de condução calculado para os sub-vales na direção i [eV] |
| ΔE_g | Redução na largura de banda proibida induzida pela aplicação de tensão mecânica [eV] |
| ΔR | Variação de resistência causada pela aplicação de tensão mecânica [Ω] |
| $\Delta \mu$ | Variação da mobilidade causada pela aplicação de tensão mecânica [$cm^2/V.s$] |
| $\Delta \rho$ | Variação da resistividade causada pela aplicação de tensão mecânica [$\Omega.m$] |
| $\Delta \phi_{mi}$ | Diferença entre a função trabalho do material de porta e do silício intrínseco [V] |
| ϵ_0 | Permissividade do vácuo [$8,854 \times 10^{-14}$ F/cm] |
| ϵ_{filme} | Deformação do filme |
| ϵ_l | Deformação longitudinal |
| ϵ_{ox} | Permissividade do óxido de silício [$3,45 \times 10^{-13}$ F/cm] |
| ϵ_{Si} | Permissividade do silício [$1,06 \times 10^{-12}$ F/cm] |
| ϵ_{xx} | Deformação na direção da largura do <i>fin</i> |
| ϵ_{xxD} | Deformação na direção da largura do <i>fin</i> e no lado direito do mesmo |
| ϵ_{xxE} | Deformação na direção da largura do <i>fin</i> e no lado esquerdo do mesmo |
| ϵ_{yy} | Deformação na direção do comprimento do <i>fin</i> |
| ϵ_{yyD} | Deformação na direção do comprimento do <i>fin</i> e no lado do dreno |
| ϵ_{yyF} | Deformação na direção do comprimento do <i>fin</i> e no lado da fonte |

| | |
|---------------|---|
| η | Diferença entre o nível de quase-Fermi dos elétrons e a energia de condução [eV] |
| θ | Fator utilizado para o cálculo da corrente de dreno por período de uma estrutura multi- <i>fin</i> , que pode assumir o valor “0” ou “1”, dependendo se o dispositivo é porta dupla ou tripla respectivamente |
| μ | Mobilidade dos portadores [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| μ_0 | Mobilidade independente de campo elétrico [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| μ_{CC} | Mobilidade dos portadores devido ao espalhamento portador-portador [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| μ_{lat} | Mobilidade nas superfícies laterais do FinFET [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| μ_{ni} | Mobilidade dos portadores devido ao espalhamento por impurezas neutras [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| μ_n | Mobilidade dos elétrons [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| $\mu_{n,eff}$ | Mobilidade dos elétrons dependente de campo elétrico [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| $\mu_{n,ii}$ | Mobilidade dos elétrons sob efeito da tensão mecânica [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| μ_{n0} | Mobilidade dos elétrons sem a presença de tensão mecânica [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| μ_{ps} | Mobilidade dos portadores devido ao espalhamento por fônons [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| μ_{psii} | Mobilidade dos portadores devido ao espalhamento por impurezas ionizadas [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| μ_{top} | Mobilidade na superfície superior do FinFET [$\text{cm}^2/\text{V.s}$] |
| ν | Coeficiente de Poisson |
| Π | Matriz dos coeficientes piezoresistivos [cm^2/dina] |
| ρ_0 | Resistividade inicial do material [$\Omega.m$] |
| σ | Tensão mecânica [Pa] |
| τ | Tempo de vida dos portadores [s] |
| τ_0 | Tempo de vida dos portadores sem a aplicação de tensão mecânica [s] |
| τ_i | Tempo de vida dos portadores nos sub-vaes da direção <i>i</i> no silício tensionado [s] |
| ϕ | Ângulo de deformação |
| ϕ_F | Potencial de Fermi [V] |
| ϕ_{MS} | Diferença da função trabalho entre o material de porta e o silício [V] |

| | |
|--------------|---|
| ϕ_{MSF} | Diferença da função trabalho entre o material de porta da primeira interface e o silício em um dispositivo SOI totalmente depletado [V] |
| ϕ_t | Potencial térmico [V] |
| ϕ_s | Potencial de superfície [V] |
| ϕ_{SAT} | Potencial de superfície acima do limiar [V] |
| ϕ_{SBT} | Potencial de superfície abaixo do limiar [V] |
| ϕ_{STH} | Potencial de superfície na condição de limiar [V] |
| ϕ_{S0} | Potencial de superfície com tensão nula na porta [V] |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-------|---|
| DELTA | <i>Fully Depleted Lean-Channel Transistor</i> (Transistor de canal vertical totalmente depletado) |
| DIBL | <i>Drain Induced Barrier Lowering</i> (Redução da barreira induzida pelo dreno) |
| DOS | <i>Density of States</i> (Densidade de estados) |
| FD | <i>Fully Depleted</i> (Totalmente depletado) |
| FET | <i>Field Effect Transistor</i> (Transistor de efeito de campo) |
| IMEC | <i>Interuniversity Microelectronics Center</i> |
| MOS | <i>Metal-Oxide-Semiconductor</i> (Metal-Óxido-Semicondutor) |
| NFD | <i>Near Fully Depleted</i> (Quase totalmente depletado) |
| PD | <i>Partially Depleted</i> (Parcialmente depletado) |
| sCESL | <i>Strained Contact-Etch Stop Layer</i> |
| SOI | <i>Silicon-on-Insulator</i> (Silício-sobre-isolante) |
| SSDOI | <i>Strained Silicon Directly On Insulator</i> (Silício tensionado diretamente sobre isolante) |
| ULSI | <i>Ultra Large Scale of Integration</i> (Altíssima escala de integração) |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 24 |
| 2 | CONCEITOS FUNDAMENTAIS | 27 |
| 2.1 | <i>Tecnologia SOI.....</i> | 27 |
| 2.2 | <i>Transistores de Múltiplas Portas.....</i> | 28 |
| 2.3 | <i>Tensão de Limiar</i> | 32 |
| 2.3.1 | Dispositivo Porta Dupla..... | 33 |
| 2.3.2 | Modelo Analítico | 39 |
| 2.4 | <i>Efeitos da Redução da Temperatura</i> | 40 |
| 2.4.1 | Efeitos nas Propriedades Elétricas dos Semicondutores | 40 |
| 2.4.2 | Efeitos nos Parâmetros Elétricos dos Transistores | 43 |
| 2.4.2.1 | Tensão de Limiar | 43 |
| 2.4.2.2 | Mobilidade..... | 44 |
| 2.4.2.3 | Transcondutância..... | 49 |
| 2.4.2.4 | Inclinação de Sublimiar | 50 |
| 2.4.2.5 | Efeitos de Canal Curto..... | 50 |
| 2.5 | <i>Aplicação de Tensão Mecânica.....</i> | 51 |
| 2.5.1 | Formação da Tensão Mecânica | 52 |
| 2.5.2 | Piezoresistência..... | 55 |
| 2.5.3 | Relação entre Tensão Mecânica e Deformação..... | 58 |
| 2.5.4 | Dependência da Tensão Mecânica Biaxial nas Dimensões dos Dispositivos | 59 |
| 2.5.5 | Efeitos na Estrutura de Faixas de Energia | 60 |
| 2.5.6 | Modelo de Mobilidade dos Elétrons devido à Redistribuição dos Portadores | 61 |
| 3 | SIMULADORES | 63 |
| 3.1 | <i>Modelos Utilizados</i> | 64 |
| 3.1.1 | Modelos Utilizados no ATLAS | 64 |
| 3.1.2 | Modelos Utilizados no <i>Sentaurus Device</i> | 65 |
| 3.2 | <i>Dispositivos Simulados.....</i> | 67 |
| 3.2.1 | Dispositivos Simulados no ATLAS..... | 67 |
| 3.2.2 | Dispositivos Simulados no <i>Sentaurus Device</i> | 68 |
| 4 | RESULTADOS OBTIDOS | 70 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.1 | <i>Estrutura de Simulação</i> | 70 |
| 4.2 | <i>Corrente de Dreno e Transcondutância</i> | 71 |
| 4.3 | <i>Inclinação de Sublimiar</i> | 73 |
| 4.4 | <i>Tensão de Limiar</i> | 74 |
| 4.4.1 | Método de Extração pela Razão g_m/I_D | 75 |
| 4.4.2 | Simulações Atlas | 77 |
| 4.4.2.1 | Expansão em Série de Taylor | 79 |
| 4.4.2.2 | Variação da Largura do <i>fin</i> | 82 |
| 4.4.3 | Resultados Experimentais | 85 |
| 4.4.4 | Simulações <i>Sentaurus Device</i> | 88 |
| 4.5 | <i>Aplicação de Tensão Mecânica</i> | 92 |
| 4.5.1 | Dispositivos Medidos | 93 |
| 4.5.2 | Dispositivos Simulados | 95 |
| 4.5.2.1 | Estratégia de Simulação | 97 |
| 4.5.2.2 | Corrente de Dreno e Transcondutância | 104 |
| 4.5.2.3 | Efeito da Tensão Mecânica na Tensão de Limiar | 108 |
| 4.5.2.4 | Dependência da Transcondutância Máxima com a Temperatura | 113 |
| 4.5.2.5 | Dependência da Inclinação da Sublimiar com a Temperatura | 116 |
| 5 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 118 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 121 |
| | APÊNDICE A | 133 |
| | APÊNDICE B | 137 |

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente miniaturização dos transistores de efeito de campo (*Field Effect Transistors* - FET) na tecnologia Metal-Óxido-Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor* - MOS), os efeitos de canal curto têm se tornado cada vez mais presentes, dificultando a implementação destes dispositivos em altíssima escala de integração (*Ultra Large Scale of Integration* - ULSI). Os dispositivos da tecnologia Silício-sobre-Isolante (*Silicon-On-Insulator* - SOI) despontaram como forma de minimizar os efeitos advindos das reduções das dimensões, através do uso de uma camada de isolante abaixo da região ativa da lâmina. Tal camada promove o isolamento elétrico, diminuindo, então, os efeitos parasitários como as capacitâncias de junção entre substrato e dreno/fonte e eliminando o efeito tiristor parasitário [1].

Apesar das vantagens da tecnologia SOI, nos dispositivos planares com comprimento de canal extremamente reduzido, o controle das cargas no canal do transistor passa a ser disputado entre a porta e as regiões de depleção de fonte e dreno [1]. A fim de se manter a crescente escala de integração dos dispositivos, transistores com mais de um eletrodo de porta tem sido utilizados como forma de aumentar o controle das cargas na região ativa, reduzindo os efeitos de canal curto e aumentando a corrente de dreno. Os primeiros dispositivos com duas portas foram fabricados na década de 80, utilizando substratos SOI. Eram constituídos de transistores verticais e foram batizados de DELTA (*fully DEpleted Lean-channel TrAnsistor*) [2]. Posteriormente, após uma alteração em seu processo de fabricação, este dispositivo passou a ser chamado de FinFET [3].

A operação dos dispositivos em temperaturas criogênicas proporciona melhora no desempenho dos transistores MOS, aumentando a mobilidade dos portadores e reduzindo a inclinação de sublimiar [4]. A baixa temperatura também afeta outros parâmetros, como a tensão de limiar. No entanto, poucos estudos foram realizados sobre a operação de transistores de múltiplas portas em função tanto da temperatura como das dimensões [5].

Devido ao elevado campo elétrico, os dispositivos MOS sofrem degradação de mobilidade com a crescente miniaturização. A mobilidade dos portadores também depende da orientação cristalográfica. No caso dos elétrons, a mobilidade é maior no plano de condução (100) que no plano (110). Geralmente, em dispositivos FinFETs, a condução ocorre tanto pelo plano (100) (superfície superior) como pelo plano (110) (superfícies laterais) [6]. Uma

alternativa que tem sido utilizada como forma de aumentar a mobilidade dos portadores é a aplicação de tensão mecânica nos dispositivos [7,8]. Estudos reportam aumento de até 60 % de mobilidade em um dispositivo SOI nMOS planar com canal tensionado [9,10].

A tensão mecânica no canal dos dispositivos pode ser induzida através da deposição de uma camada de nitreto de silício sobre a região de porta do dispositivo. Esta camada irá provocar tensão mecânica na direção do comprimento do canal [11]. Outra forma de induzir tensão tem como base a formação do substrato. Neste caso, utilizam-se ligas de $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, diminuindo a concentração de germânio na liga até que se chegue em silício puro na região ativa. Esta camada de silício estará sob o efeito de tensão mecânica agindo tanto na direção do comprimento do canal como na largura do mesmo [12], comumente referido como tensão biaxial (*biaxial stress*).

Neste trabalho será apresentado um estudo dos dispositivos de múltiplas portas operando em temperaturas criogênicas, com e sem a presença de tensão mecânica, desde 100 K até 400 K. Inicialmente, um estudo detalhado sobre a tensão de limiar dos transistores de múltiplas portas será desenvolvido. Será analisada a influência das dimensões dos dispositivos sobre os parâmetros estudados. O método de extração da tensão de limiar será avaliado para dispositivos com concentração de dopantes natural da lâmina no canal do transistor, procurando relacioná-lo à sua física de funcionamento. Ainda nesta análise, são considerados os efeitos quânticos que tomam parte em dispositivos bastante estreitos. Os resultados são obtidos através de dispositivos medidos e de simulações numéricas tridimensionais utilizando dois simuladores: Atlas [13] e *Sentaurus Device* [14].

A aplicação de tensão mecânica é avaliada inicialmente nos dispositivos medidos, sendo posteriormente realizadas simulações numéricas tridimensionais no simulador Sentaurus, a fim de se comprovar os resultados medidos e de entender os fenômenos físicos associados a estes. As simulações de tensão mecânica serão baseadas em uma distribuição não uniforme da mesma no dispositivo. Será analisada a influência da tensão mecânica na transcondutância, que está diretamente relacionada à mobilidade, na tensão de limiar e inclinação de sublimiar. A influência conjunta da temperatura e da tensão mecânica também será analisada, especialmente na tensão de limiar.

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos necessários para o desenvolvimento do trabalho. Assim, são abordados o funcionamento dos transistores de múltiplas portas e a operação em temperaturas criogênicas. Os efeitos da aplicação da tensão mecânica no silício são

apresentados e a definição de tensão de limiar em um dispositivo com concentração de dopantes natural da lâmina é revista.

No Capítulo 3 é feita uma breve introdução aos simuladores utilizados, descrevendo os modelos físicos usados, bem como fazendo a comparação entre os modelos de cada simulador. Neste capítulo ainda é descrita a estrutura simulada. São detalhados os parâmetros estudados ao longo do trabalho de forma a considerar o efeito da orientação cristalográfica e os parâmetros alterados de forma a aproximar os resultados de dois simuladores.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos pelas simulações de ambos os programas utilizados, assim como dos dispositivos medidos. Inicialmente, é feita a análise da corrente, da transcondutância e da inclinação de sublimar, a fim de se verificar o efeito da redução da temperatura. Posteriormente, é analisada a tensão de limiar considerando-se dois métodos de extração nos dispositivos simulados e medidos. A tensão de limiar é também comparada com modelos analíticos. Por fim, é desenvolvida a análise da aplicação de tensão mecânica sob os mesmos parâmetros (tensão de limiar, inclinação de sublimar e transcondutância). Ao longo desta análise será vista a influência tanto da tensão mecânica como da temperatura nestes parâmetros.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas ao longo do trabalho e, também, serão acrescentadas as propostas de continuidade do trabalho.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados os transistores de múltiplas portas em tecnologia SOI, especialmente o FinFET que será abordado ao longo do trabalho, bem como o método de extração da tensão de limiar nesses dispositivos. Também serão apresentados os efeitos decorrentes da redução da temperatura nos semicondutores e nos parâmetros elétricos dos dispositivos, assim como os efeitos da aplicação de tensão mecânica (*stress*) nestes.

2.1 Tecnologia SOI

Os transistores SOI (*Silicon-On-Insulator* - silício-sobre-isolante) surgiram como uma alternativa aos transistores convencionais (*bulk*), de forma a isolar o substrato da região ativa da lâmina, reduzindo as capacitâncias parasitárias e eliminando o tiristor parasitário, que são resultantes da interação entre essas duas regiões [1]. Os transistores SOI são divididos em três tipos, que dependem da espessura da camada de silício (t_{Si}), da concentração de dopantes e da temperatura: dispositivo parcialmente depletado (*Partially Depleted* - PD), totalmente depletado (*Fully Depleted* - FD) e quase totalmente depletado (*Near Fully Depleted* - NFD). Em um dispositivo nMOS convencional, a espessura máxima da camada de depleção x_{dmax} é dada por [15]:

$$x_{dmax} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si} 2\phi_F}{q N_A}} \quad (2.1)$$

onde ε_{Si} é a permissividade do silício, N_A é a concentração de impurezas aceitadoras do substrato, q é a carga do elétron e ϕ_F é o potencial de Fermi, dado por:

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (2.2)$$

onde k é a constante de Boltzmann, n_i é a concentração intrínseca do silício e T é a temperatura absoluta.

Se a espessura da camada de silício for maior que duas vezes x_{dmax} , então não haverá interação entre as camadas de depleção da primeira e da segunda interface. Assim, o dispositivo estará parcialmente depletado (PD). Entre as regiões de depleção, haverá uma região neutra que poderá estar conectada à referência ou não. Caso haja contato e este esteja aterrado, o dispositivo se comportará como um MOS convencional. Caso não haja contato, o dispositivo apresentará efeitos de corpo flutuante [16].

Se t_{Si} for menor que x_{dmax} , ocorrerá uma interação entre as duas regiões de depleção e o dispositivo estará totalmente depletado (FD) para tensões de porta acima da tensão de limiar (V_{TH}). Estes transistores apresentam melhores características quando comparados ao MOS convencional como a redução do campo elétrico horizontal [17], a maior mobilidade dos portadores na região do canal [18], a diminuição nos efeitos de canal curto [19], entre outras. As vantagens deste transistor estão relacionadas com o menor fator de corpo, que está ligado às menores capacitâncias parasitas em relação ao MOS convencional [20].

Se a espessura t_{Si} for maior que x_{dmax} mas menor que 2 vezes x_{dmax} , então o dispositivo, chamado de quase totalmente depletado (NFD), poderá se comportar como um SOI totalmente depletado ou parcialmente depletado, dependendo da tensão aplicada ao substrato do dispositivo [1].

2.2 Transistores de Múltiplas Portas

A fim de se aumentar a corrente de dreno e minimizar os efeitos de canal curto, foram desenvolvidos os transistores de múltiplas portas [1]. A ocorrência dos efeitos de canal curto está relacionada ao controle das cargas no canal que passa a ser disputado pelas regiões de depleção de fonte e dreno em dispositivos com comprimento de canal reduzido. Nos dispositivos de múltiplas portas, o controle das cargas no canal é exercido por mais de um eletrodo. Por exemplo, no caso de um dispositivo de porta dupla, há uma porta superior e outra inferior exercendo o controle das cargas enquanto que em um dispositivo de porta simples este controle seria realizado apenas pela porta superior. Dessa forma, como o controle será maior, os efeitos de canal curto são reduzidos.

Há diversos dispositivos de porta dupla, tripla ou circundante. Entre os transistores de porta dupla pode-se mencionar XMOS [21], DELTA [2], FinFET [22], *Gate-All-Around* (GAA) [23], entre outros. Como dispositivos porta tripla tem-se o *junctionless* [24], o *triple-gate*, o π -*gate* [25], o Ω -*gate* [26], sendo que estes dois últimos apresentam extensões nas portas laterais, possuindo um número de portas efetivo entre três e quatro, devido ao aumento do controle eletrostático no canal, sendo então considerados como *triple-gate plus* (3+) e como dispositivo com porta circundante tem-se o CYNTHIA [27].

O dispositivo DELTA (*fully DEpleted Lean-channel TrAnsistor*) [2] foi o primeiro transistor porta dupla a ser fabricado, sendo constituído de uma estreita e alta camada de silício chamada de “*finger*”, “*fin*” ou “*leg*”, utilizando substrato SOI. Esta camada de silício é envolta por isolante e material de porta, fazendo com que o dispositivo apresente canais de condução em suas laterais e no seu topo. O transistor FinFET é similar ao DELTA, sendo que a diferença entre eles é a presença de um dielétrico no topo do *fin* do primeiro, chamada de “*hard mask*”, a fim de se evitar a formação de canais parasitas nos cantos superiores do dispositivo. O FinFET, por apresentar a camada de dielétrico espesso no topo, é um dispositivo porta dupla independentemente da largura do *fin*. Já o DELTA, pode se comportar como um dispositivo porta dupla se a altura do *fin* (H_{Fin}) for consideravelmente maior que a largura do mesmo (W_{Fin}) ou como um dispositivo porta tripla se H_{Fin} e W_{Fin} apresentarem tamanhos similares (neste caso também são chamados de *triple-gate* FinFET ou FinFET de porta tripla [28]) ou como um transistor de porta simples se W_{Fin} for consideravelmente maior que H_{Fin} [29]. A Figura 2.1 mostra a representação esquemática de um dispositivo FinFET de porta tripla, onde t_{ox} e t_{box} representam as espessuras das camadas do óxido de porta e do óxido enterrado, respectivamente.

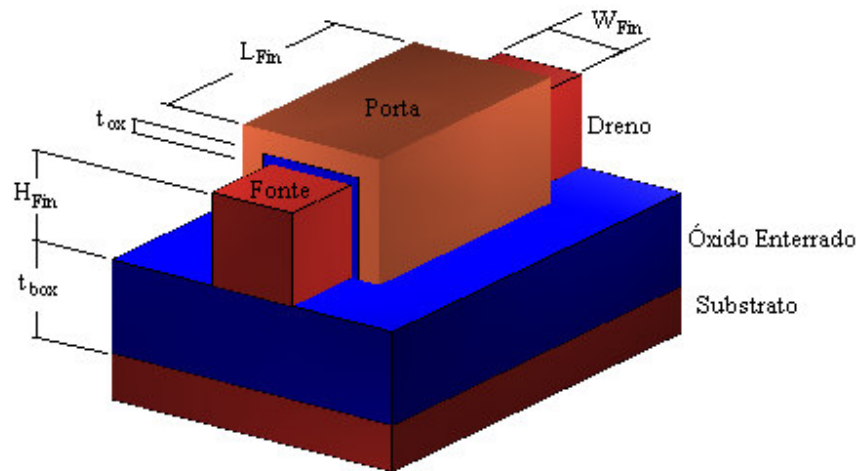


Figura 2.1 – Representação esquemática de um dispositivo porta tripla.

A corrente de dreno é, de forma geral, proporcional à largura total do transistor [30]. Sendo assim, um dispositivo de porta dupla apresentaria o dobro de corrente de um porta simples devido à formação de dois canais de inversão. Já um dispositivo de porta tripla, considerando a seção transversal quadrada, apresentaria o triplo de corrente, se as mobilidades dos portadores nos diferentes planos de condução fossem as mesmas. Entretanto, as mobilidades nas superfícies do transistor dependem da orientação cristalográfica do silício. Usualmente, o topo da lâmina apresenta orientação (100) e as laterais apresentam orientação (110), sendo que nesta segunda a mobilidade é menor [6,31]. Para se obter correntes de dreno maiores, são utilizados múltiplos *fins* em paralelo, como apresentado na Figura 2.2.

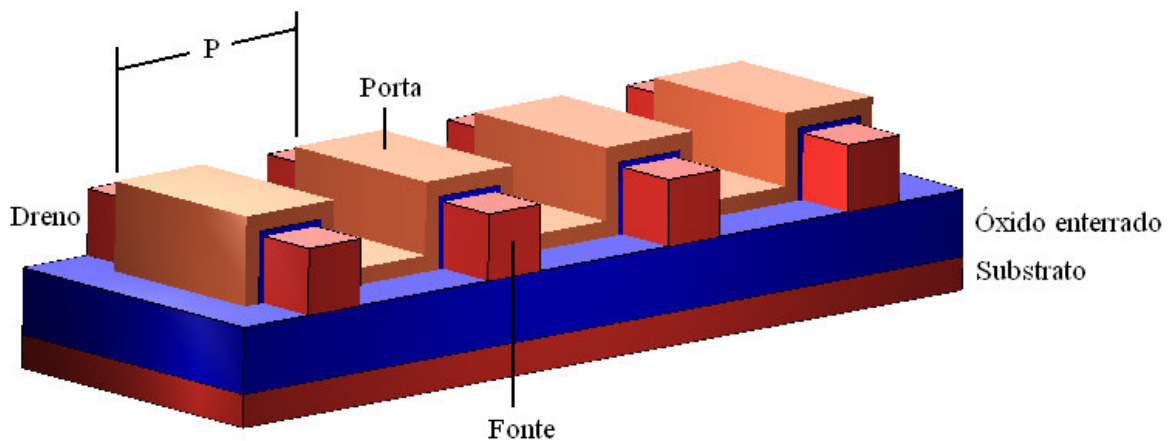


Figura 2.2 – Estrutura multi-*fins*.

A corrente por período que atravessa a estrutura multi-*fins* é dada pela equação (2.3) ou (2.4), dependendo se a mobilidade for considerada igual nas superfícies laterais e superior ou for considerada diferente, respectivamente [32].

$$I_D = I_{D0} \frac{(W_{Fin} + 2H_{Fin})}{P} \quad (2.3)$$

$$I_D = I_{D0} \frac{(\theta \mu_{top} W_{Fin} + 2\mu_{lat} H_{Fin})}{\mu_{top} P} \quad (2.4)$$

onde I_{D0} é a corrente de um dispositivo planar de porta simples, P é o período da estrutura (distância entre dois *fins* consecutivos), μ_{top} e μ_{lat} são as mobilidades do topo e das laterais, respectivamente, e θ é um fator que assume o valor “0” se o dispositivo for de porta dupla ou “1” se for de porta tripla [33].

Usualmente, estes transistores são construídos utilizando-se a concentração de dopantes natural da lâmina, isto é, sem implantação iônica no canal para ajuste da tensão de limiar (V_{TH}), como é feito nos transistores planares. Nestes dispositivos, V_{TH} é controlado pelo material de porta, que geralmente apresenta função trabalho próxima à do silício intrínseco (*midgap material*). A baixa concentração no canal minimiza o chamado efeito de canto, que decorre do campo elétrico maior nos cantos superiores do *fin* devido à presença de campos lateral e horizontal. Este efeito poderia implicar em tensões de limiar diferentes entre as superfícies planas e os cantos [34,35].

Se estes transistores apresentarem a espessura da camada de silício (ou largura do *fin*) bem estreita (menores que 10nm), efeitos quânticos devido ao confinamento dos elétrons passam a influenciar mais significativamente o funcionamento do dispositivo. O confinamento dos elétrons na direção da largura do *fin* resulta na formação de sub-bandas de energia, alterando a distribuição dos elétrons na camada de silício. A camada de inversão deixa de se localizar na superfície Si-SiO₂, dando origem à inversão de volume, onde os portadores de inversão passam a se distribuir ao longo da camada de silício [30,36,37].

Os dispositivos FinFET estudados neste trabalho utilizam a tecnologia SOI e estão sempre totalmente depletados, devido à espessura da camada de silício utilizada e à baixa concentração de dopantes.

2.3 Tensão de Limiar

Para um dispositivo MOS convencional, a tensão de limiar é, usualmente, definida como sendo a tensão na qual a concentração de portadores minoritários na superfície é a mesma da concentração de portadores majoritários no substrato. Isso faz com que o potencial de superfície seja duas vezes o potencial de Fermi [15]. Para os transistores nMOSFET convencional e SOI parcialmente depletados a tensão de limiar para $\phi_s = 2\phi_F$ é dada por [38]:

$$V_{TH} = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{qN_A x_{dmax}}{C_{ox}} + \frac{qN_{it}\phi_F}{C_{ox}} \quad (2.5)$$

onde V_{FB} é a tensão de faixa plana obtida por $V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$, sendo ϕ_{MS} a diferença da função trabalho entre o eletrodo de porta e o silício, Q_{ox} a densidade de cargas fixas no óxido por unidade de área e N_{it} a densidade de armadilhas de interface na primeira interface Si-SiO₂ por unidade de área.

Já nos transistores SOI totalmente depletados, a tensão de limiar depende da polarização do substrato V_{GB} , pois esta varia o potencial da segunda interface (acumulada, depletada ou invertida), que interage com o de primeira interface. Assim, estes dispositivos podem apresentar três equações para a tensão de limiar. Tais equações são derivadas das equações de Lim & Fossum [20] e são dadas por (2.6), (2.7) e (2.8), respectivamente, para a segunda interface acumulada, invertida e depletada. Na dedução das equações, a densidade de cargas de inversão na primeira interface é considerada nula e o potencial de superfície na mesma interface é considerado duas vezes o potencial de Fermi para os três casos, enquanto que o potencial de superfície na segunda interface é considerado nulo para a mesma acumulada, $2\phi_F$ para invertida e um valor intermediário entre os dois para a interface depletada [1].

$$V_{thf,accB} = \phi_{MSF} - \frac{Q_{oxf}}{C_{oxf}} + \left(1 + \frac{C_{Si}}{C_{oxf}}\right) 2\phi_F - \frac{Q_{depl}}{2C_{oxf}} \quad (2.6)$$

$$V_{\text{thf,invB}} = \phi_{\text{MSF}} - \frac{Q_{\text{oxf}}}{C_{\text{oxf}}} + 2\phi_F - \frac{Q_{\text{depl}}}{2C_{\text{oxf}}} \quad (2.7)$$

$$V_{\text{thf,deplB}} = V_{\text{thf,accB}} - \frac{C_{\text{Si}} C_{\text{oxb}}}{C_{\text{oxf}} (C_{\text{Si}} + C_{\text{oxb}})} (V_{\text{GB}} - V_{\text{GB,accB}}) \quad (2.8)$$

onde $V_{\text{GB,accB}}$ é a tensão aplicada ao substrato para que a segunda interface acumule, C_{oxf} é a capacitância do óxido de porta da primeira interface por unidade de área, C_{Si} é a capacitância do silício por unidade de área, C_{oxb} é a capacitância do óxido de porta da segunda interface por unidade de área, Q_{depl} é a densidade de cargas de depleção por unidade de área, Φ_{MSF} é a diferença da função trabalho entre o material de porta da primeira interface e o silício e Q_{oxf} é a densidade de cargas fixa no óxido da primeira interface por unidade de área.

O método clássico de extração da tensão de limiar consiste no cálculo da segunda derivada da curva da corrente em função da tensão de porta (V_G) e obtenção do seu ponto de máximo [39]. Considera-se que, ao aumentar a tensão na porta, sendo que o dreno se encontra polarizado com uma tensão baixa, o transistor passa diretamente da região de sublimiar para a região de triodo. A curva da corrente em função de V_G nessas duas regiões tende a ser linear, assim, a segunda derivada em ambas as regiões tenderia a zero e o pico (ponto de máximo) seria a transição entre elas. Embora este método seja simples, sua extração nas medidas experimentais é dificultada pelo ruído, que é amplificado com as derivadas [39].

2.3.1 Dispositivo Porta Dupla

Para transistores porta dupla com dopagem intrínseca (ou natural da lâmina), a definição de limiar não é tão clara [40]. O potencial de superfície na condição de limiar passa a ser maior que $2\phi_F$ e a concentração de portadores de inversão nesta condição poderá ser maior em um dispositivo estreito que em outro mais largo [30].

A tensão de limiar está num ponto de inversão moderada, entre a inversão forte e a fraca. No primeiro regime a condução é aproximadamente linear/quadrática enquanto no segundo é exponencial. O ponto de limiar varia nesse intervalo dependendo da definição adotada. No regime de inversão fraca, a componente de condução que predomina é a de difusão ($I_{D,\text{difusão}}$),

enquanto que no regime de inversão forte a componente de deriva ($I_{D,deriva}$) é a predominante. A corrente de difusão é gerada pela diferença de concentrações, enquanto que a corrente de deriva é formada pela aplicação de campo elétrico. Assim, uma possível definição de tensão de limiar é o ponto na qual ambas as componentes da corrente apresentam a mesma magnitude [41].

A corrente de dreno para um nMOSFET, de acordo com o modelo de Pao-Sah [42], é dada por:

$$I_D = I_{D,deriva} + I_{D,difusão} = -\alpha\mu_n WQ_e' \frac{dV_C}{dy} \quad (2.9)$$

onde α é um fator que assume o valor 1 para o MOSFET convencional planar e 2 para o MOSFET de porta dupla simétrico, μ_n é a mobilidade dos elétrons, W é a largura do canal, Q_e' é metade da densidade de carga móvel em um dispositivo porta dupla simétrico, V_C é a tensão no canal e “y” é o eixo na direção do comprimento de canal. A componente de difusão da corrente é descrita por:

$$I_{D,difusão} = \alpha\mu_n W\phi_t \frac{dQ_e'}{dy} \quad (2.10)$$

onde ϕ_t é o potencial térmico calculado por kT/q .

Sendo a corrente de deriva igual à de difusão na condição de limiar e substituindo (2.10) em (2.9), tem-se:

$$-\alpha\mu_n WQ_e' \frac{dV_C}{dy} = 2\alpha\mu_n W\phi_t \frac{dQ_e'}{dy} \quad (2.11)$$

Simplificando e reescrevendo a equação (2.11):

$$\left(\frac{dQ_e'}{dV_C} \frac{1}{Q_e'} \right)_{\text{no limiar}} = -\frac{1}{2\phi_t} \quad (2.12)$$

A solução da equação de Poisson-Boltzmann para um dispositivo nMOSFET de porta dupla e dopagem intrínseca, de acordo com a ref. [43], é dada por:

$$Q_e' = -4C_{Si}\phi_t\beta \tan(\beta) \quad (2.13a)$$

$$\frac{V_G - V_{FB} - V_C}{2\phi_t} - \ln\left(\frac{4L_{Di}}{t_{Si}}\right) = \ln\left(\frac{\beta}{\cos(\beta)}\right) + 2\frac{C_{Si}}{C_{ox}}\beta \tan(\beta) \quad (2.13b)$$

onde t_{Si} é a espessura da camada de silício (ou a largura do *fin*), C_{ox} é a capacitância do óxido por unidade de área dado por ϵ_{ox}/t_{ox} , onde ϵ_{ox} é a permissividade do óxido de silício. β é uma variável auxiliar que está relacionada a densidade de carga e L_{Di} é o comprimento intrínseco de Debye, dado por $L_{Di} = \sqrt{\epsilon_{Si}\phi_t/(2qn_i)}$.

Derivando a equação (2.13a) em função de V_G e em função de V_C pode-se chegar respectivamente em (2.14a) e (2.14b):

$$\frac{dQ_e'}{dV_G} = -4C_{Si}\phi_t(\tan(\beta) + \beta + \beta \tan^2(\beta))\frac{d\beta}{dV_G} \quad (2.14a)$$

$$\frac{dQ_e'}{dV_C} = -4C_{Si}\phi_t(\tan(\beta) + \beta + \beta \tan^2(\beta))\frac{d\beta}{dV_C} \quad (2.14b)$$

Isolando V_G em (2.13b), derivando em função de β e invertendo seu resultado, tem-se:

$$\frac{d\beta}{dV_G} = \frac{1}{\frac{dV_G}{d\beta}} = \frac{1}{\frac{d}{d\beta}\left(\ln\left(\frac{\beta}{\cos(\beta)}\right) + 2\frac{C_{Si}}{C_{ox}}\beta \tan(\beta)\right)} \quad (2.15)$$

Isolando V_C em (2.13b) e fazendo-se de forma análoga ao anterior:

$$\frac{d\beta}{dV_C} = \frac{1}{\frac{dV_C}{d\beta}} = \frac{1}{\frac{d}{d\beta}\left(-\ln\left(\frac{\beta}{\cos(\beta)}\right) - 2\frac{C_{Si}}{C_{ox}}\beta \tan(\beta)\right)} \quad (2.16)$$

Pelas equações (2.15) e (2.16), pode-se perceber que $d\beta/dV_G = -d\beta/dV_C$, e conseqüentemente, pelas equações (2.14) tem-se $dQ_e'/dV_G = -dQ_e'/dV_C$. Substituindo em (2.12):

$$\left(\frac{dQ_e'}{dV_G} \frac{1}{Q_e'} \right)_{\text{no limiar}} = \frac{1}{2\phi_t} \quad (2.17)$$

A condição expressa em (2.17) representa o instante no qual a tensão de limiar pode ser obtida utilizando a igualdade das componentes da corrente.

Assim, será integrada a equação (2.9) no intervalo de y entre "0" ($V_C(0)$ é a tensão na fonte e será mantida nula) e L ($V_C(L)$ é a tensão no dreno e é chamada de V_D). A densidade de cargas Q_e' será considerada constante ao longo do canal (para tal condição ser verdadeira a tensão aplicada no dreno deve ser baixa). Então, tem-se:

$$I_D = -\alpha\mu_n \frac{W}{L} Q_e' V_D \quad (2.18)$$

Derivando a equação (2.18) em relação a tensão na porta e considerando a mobilidade μ_n independente de V_G , pode-se obter:

$$\frac{dQ_e'}{dV_G} = -\frac{L}{\alpha\mu_n W V_D} \frac{dI_D}{dV_G} = -\frac{L}{\alpha\mu_n W V_D} g_m \quad (2.19)$$

onde g_m é a transcondutância.

Dividindo (2.19) pela densidade de cargas Q_e' isolada da equação (2.18):

$$\frac{dQ_e'}{dV_G} \frac{1}{Q_e'} = \frac{g_m}{I_D} \quad (2.20)$$

Substituindo (2.20) em (2.17):

$$\left(\frac{g_m}{I_D}\right)_{\text{no limiar}} = \frac{1}{2\phi_t} \quad (2.21)$$

Substituindo a equação (2.15) em (2.14a) e dividindo por (2.13a):

$$\frac{dQ_e'}{dV_G} \frac{1}{Q_e'} = \frac{(\tan(\beta) + \beta + \beta \tan^2(\beta))}{2\phi_t \tan(\beta) \left[1 + \beta \tan(\beta) + \beta \frac{2C_{Si}}{C_{ox}} (\tan(\beta) + \beta + \beta \tan^2(\beta)) \right]} \quad (2.22)$$

O ponto de máximo da equação (2.22) ocorre quando β for nulo e neste ponto tem-se que:

$$\left(\frac{dQ_e'}{dV_G} \frac{1}{Q_e'}\right)_{MAX} = \left(\frac{g_m}{I_D}\right)_{MAX} = \frac{1}{\phi_t} \quad (2.23)$$

Esta relação (2.23) ocorre quando o fator de corpo do dispositivo for muito próximo da unidade, como é o caso dos dispositivos porta dupla [44].

Dessa forma, pelas equações (2.23) e (2.21), pode-se concluir que:

$$\left(\frac{g_m}{I_D}\right)_{\text{no limiar}} = \frac{\left(\frac{g_m}{I_D}\right)_{MAX}}{2} \quad (2.24)$$

Assim, a condição limiar ocorre quando a razão g_m/I_D for reduzida a metade do seu valor máximo [41,45]. A Figura 2.3 mostra um exemplo de extração de limiar utilizando este método.

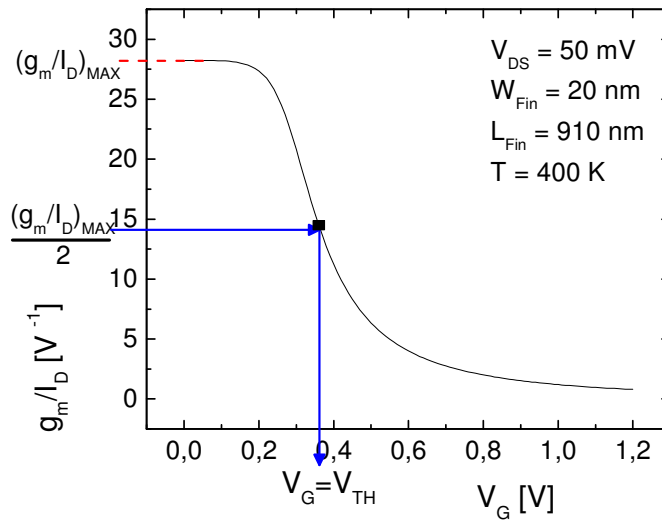


Figura 2.3 – Exemplo de extração da tensão de limiar utilizando o método da razão de g_m/I_D .

O símbolo na Figura 2.3 representa o ponto onde $g_m/I_D = 1/(2\phi_t)$ mostrando que, de fato, a metade do valor máximo de g_m/I_D é igual a metade do inverso do potencial térmico, como previsto pela demonstração do método.

A razão g_m/I_D representa a eficácia de um dispositivo em converter corrente elétrica em transcondutância [46]. Normalmente, g_m/I_D é apresentado em função da corrente de dreno normalizada ($I_D/(W/L)$), permitindo o dimensionamento de dispositivos de acordo com a região de operação (inversão fraca, moderada ou forte) [46]. Para a extração de V_{TH} , esta curva é apresentada em função da tensão de porta V_G .

Como a razão g_m/I_D não apresenta dependência com a mobilidade dos portadores, esse método é praticamente insensível ao fenômeno de inversão de volume. Este fenômeno ocorre em transistores estreitos devido ao fato dos portadores não estarem mais confinados nas interfaces Si/SiO₂, mas no centro do dispositivo [47].

O método clássico de extração de V_{TH} descrito no item 2.3, que representa uma definição comportamental da tensão de limiar, também pode ser utilizado para os dispositivos de múltiplas portas.

2.3.2 Modelo Analítico

Para um dispositivo porta dupla estreito, a carga de depleção é muito pequena e pode ser desprezada, enquanto que outros efeitos como a divisão das bandas de energia em sub-bandas e uma maior concentração de cargas de inversão passam a contribuir para a variação da tensão de limiar. Em um dispositivo porta dupla com dopagem próxima da intrínseca, a capacitância de depleção pode ser desprezada se [48]:

$$qN_A W_{Fin} \ll 2C_{ox} \frac{kT}{q} \quad (2.25)$$

Pela equação (2.25), tem-se que um dispositivo porta dupla em temperatura ambiente com concentração de dopantes de 10^{15} cm^{-3} e espessura de óxido de porta de 2 nm, a carga de depleção poderá ser desprezada se $W_{Fin} \ll 5 \text{ } \mu\text{m}$. Considerando o mesmo dispositivo em uma temperatura de 100 K, a carga de depleção poderá ser desprezada se $W_{Fin} \ll 1,5 \text{ } \mu\text{m}$.

Nesse caso, a tensão de limiar pode ser descrita por [48]:

$$V_{TH} = \Delta\phi_{mi} + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{2C_{ox} kT}{q^2 n_i W_{Fin}}\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2q m^* W_{Fin}^2} \quad (2.26)$$

onde $\Delta\phi_{mi}$ é a diferença da função trabalho entre o material de porta e o silício, m^* é a massa de confinamento do portador na direção transversal e \hbar é a constante normalizada de Planck dada por $\hbar = h/2\pi$ onde h é a constante de Planck.

O segundo termo da equação (2.26) está relacionado com o potencial no canal que, como foi mencionado anteriormente, para um dispositivo porta dupla com *fin* estreito, pode ser maior que $2\phi_F$. Assim, um dispositivo estreito na condição de limiar apresenta uma concentração de portadores de inversão maior que um dispositivo mais largo. Ou seja, é esperado um pequeno aumento da tensão de limiar ao se reduzir a largura do *fin*. O terceiro termo da equação está relacionado com a variação da energia mínima da banda de condução e é obtido pela solução da equação de Schrödinger [30]. Este termo gera um aumento acentuado da tensão de limiar com a redução de W_{Fin} para *fins* bem estreitos, como pode ser visto na Figura 2.4, a qual apresenta a

tensão de limiar em função da largura do *fin* obtida solucionando-se a equação (2.26), considerando ou desprezando o terceiro termo da equação. Para obter a tensão de limiar apresentada na Figura 2.4, foi considerada, a temperatura de 300 K, a espessura do óxido de porta de 2 nm, a concentração intrínseca conforme será descrito no item 2.4.1, a função trabalho do material de porta de 4,7 eV e a função trabalho do silício intrínseco de $(4,15 + E_G/2)$ onde E_G é a largura de faixa proibida do silício conforme será apresentado no item 2.4.1.

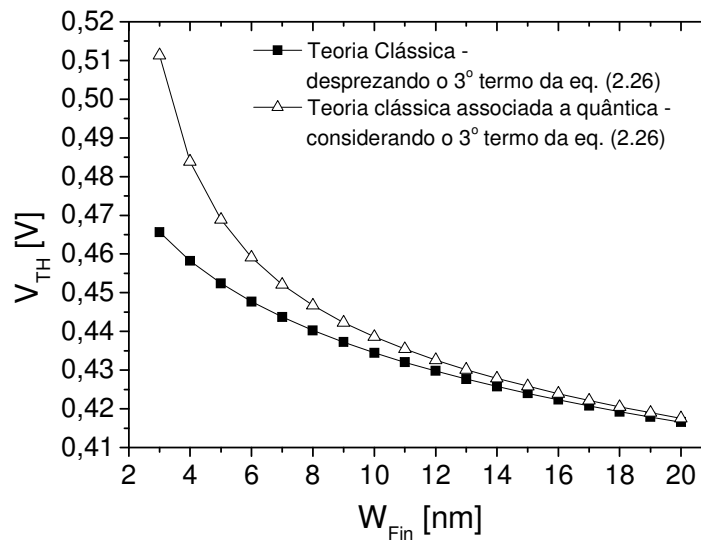


Figura 2.4 – Curva da tensão de limiar em função de W_{Fin} obtida da equação (2.26), enfatizando a influência do termo associado à solução da equação de Schrödinger.

2.4 Efeitos da Redução da Temperatura

A redução da temperatura provoca uma série de efeitos nas propriedades elétricas dos semicondutores e nos parâmetros elétricos dos dispositivos. Alguns desses efeitos, diretamente relacionados com este trabalho, serão apresentados nesta seção.

2.4.1 Efeitos nas Propriedades Elétricas dos Semicondutores

A concentração intrínseca de portadores (n_i) no semicondutor, que indica a quantidade de portadores livres gerados por excitação térmica, depende apenas do material e da temperatura.

Assim, na temperatura de 0 K não há portadores livres. Ao aumentar a temperatura, os elétrons ganham energia suficiente para se tornarem elétrons livres, gerando pares elétron-lacuna. A concentração intrínseca é dada por [4]:

$$n_i = \sqrt{N_C \cdot N_V} \cdot \exp\left(\frac{-E_G}{2kT}\right) \quad (2.27)$$

onde N_C e N_V são, respectivamente, as densidades de estados das bandas da condução e valência.

A largura da faixa proibida do silício (E_G), dada por (2.28) [49]:

$$\begin{aligned} E_G &= 1,17 + 1,059 \cdot 10^{-5} \cdot T - 6,05 \cdot 10^{-7} \cdot T^2, \quad T \leq 170K \text{ ou} \\ E_G &= 1,1785 - 9,025 \cdot 10^{-5} \cdot T - 3,05 \cdot 10^{-7} \cdot T^2, \quad T > 170K \end{aligned} \quad (2.28)$$

A Figura 2.5 mostra a variação da concentração intrínseca de portadores (n_i) e da largura de faixa proibida do silício (E_G) com a temperatura entre 50 K e 400 K. No cálculo de n_i , as densidades de estados N_C e N_V foram calculadas de acordo com a ref. [4]. Pode-se notar que há um pequeno aumento de E_G com a redução da temperatura, enquanto que n_i diminui muitas ordens de grandeza na mesma faixa.

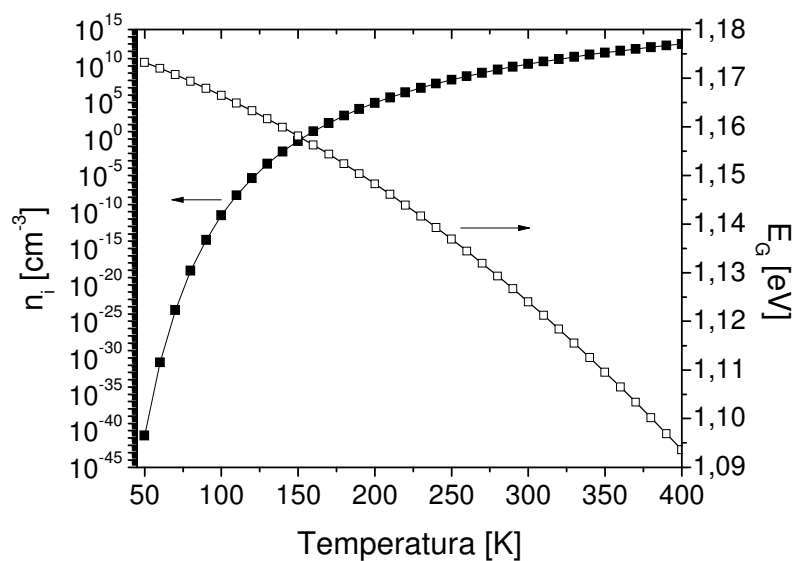


Figura 2.5 – Variação da concentração intrínseca de portadores e da largura de faixa proibida do silício em função da temperatura.

Em um semiconductor dopado, em temperaturas criogênicas, a energia térmica disponível não é suficiente para ionizar todas as impurezas [49]. Dessa forma, a quantidade de portadores ionizados (N_A^-) será menor que a concentração de impurezas aceitadoras N_A presentes no material e pode ser expressa por:

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + 4 \exp\left(\frac{E_A - E_{Fp}}{kT}\right)} \quad (2.29)$$

ou, no caso de impurezas doadoras:

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_D}{kT}\right)} \quad (2.30)$$

onde N_D é a concentração de impurezas doadoras, E_A e E_D são os níveis de energia das impurezas, E_{Fn} e E_{Fp} são os níveis de Fermi para os elétrons e para as lacunas [50].

O potencial de Fermi (ϕ_F), descrito na equação (2.2), também depende da temperatura. Nesse caso, a concentração N_A deve ser substituída por N_A^- . A Figura 2.6 mostra a variação do potencial de Fermi e da porcentagem de impurezas ionizadas com a temperatura para silício com diversas concentrações de dopantes. Para obter N_A^- , E_{Fp} foi calculado de acordo com a ref. [50]. Pode-se perceber que ao reduzir a temperatura, o potencial ϕ_F aumenta, devido à enorme redução da concentração intrínseca n_i . O aumento de ϕ_F é menor para a concentração de dopantes mais alta. Em temperaturas muito baixas, inferiores a 50 K, uma parcela ínfima das impurezas é ionizada.

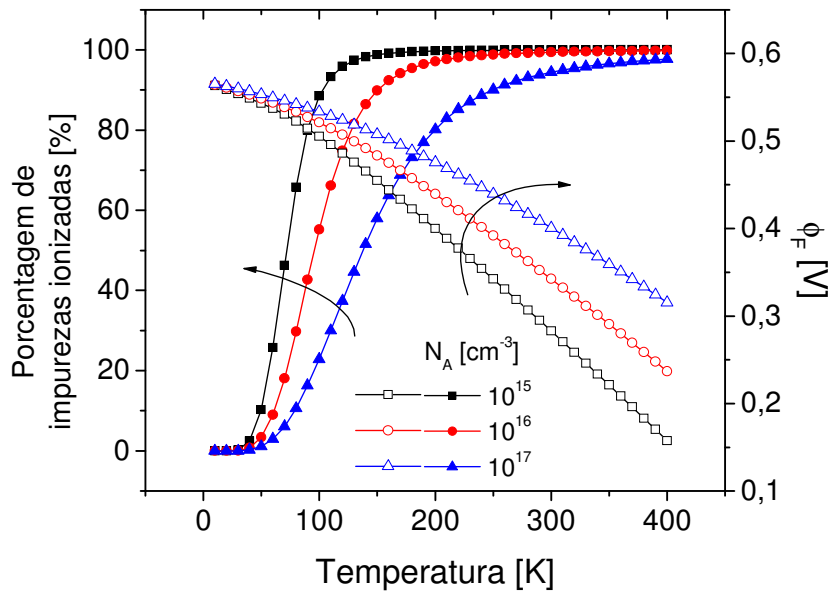


Figura 2.6 – Variação do potencial de Fermi e da porcentagem de impurezas ionizadas com a temperatura para diversas concentrações de dopantes.

2.4.2 Efeitos nos Parâmetros Elétricos dos Transistores

Nesta seção será apresentada a influência da temperatura em alguns parâmetros elétricos dos dispositivos.

2.4.2.1 Tensão de Limiar

Conforme mencionado anteriormente, para um transistor MOSFET convencional ou SOI parcialmente depletado a tensão de limiar é dada pela equação (2.5). Com o aumento do potencial de Fermi devido à redução da temperatura, a parcela das armadilhas de interface torna-se mais significativa. Derivando a equação (2.5) em relação a T, tem-se [38]:

$$\frac{dV_{TH}}{dT} = \frac{d\phi_F}{dT} \left[1 + \alpha_{V_T} \frac{q}{C_{oxf}} \left(\frac{\epsilon_{Si} N_A}{kT \ln(N_A / n_i)} \right)^{1/2} + \frac{qN_{if}}{C_{oxf}} \right] \quad (2.31)$$

onde $\alpha_{V_i}=1$.

Para um transistor SOI totalmente depletado, a variação da carga de depleção com a temperatura pode ser desprezada e a variação de V_{TH} com a temperatura pode ser dada pela equação (2.31) com $\alpha_{V_i}=0$ [1]. Caso este dispositivo apresente a mesma densidade de armadilhas de interface que um MOS convencional, a variação de V_{TH} com “T” no SOI totalmente depletado será menor que no MOS convencional. Se as armadilhas de interface forem desprezadas, a variação de V_{TH} com “T” no transistor SOI totalmente depletado será a própria variação de ϕ_F .

Considerando que a função trabalho do material de porta independe da temperatura e que a função trabalho do silício intrínseco é $(4,15 + E_G/2)$, pode-se diferenciar a equação (2.26) em relação a T, obtendo a variação de V_{TH} para um transistor porta dupla:

$$\frac{dV_{TH}}{dT} = -\frac{1}{2} \frac{dE_G}{dT} + \frac{k}{q} \left(1 + \ln \left(\frac{2C_{ox} kT}{q^2 n_i W_{Fin}} \right) - \frac{T}{n_i} \frac{dn_i}{dT} \right) \quad (2.32)$$

A análise da equação (2.32) mostra que a variação de V_{TH} depende da variação de E_G e de n_i com T, bem como depende da própria temperatura.

2.4.2.2 Mobilidade

A mobilidade dos portadores nos dispositivos reflete diretamente na capacidade destes de fornecer corrente, sendo, portanto, um parâmetro muito importante nos transistores MOS. O movimento dos portadores em um cristal semiconductor é limitado por diversos mecanismos de espalhamento, alguns dos quais apresentam forte dependência com a temperatura. Tais mecanismos podem ser classificados como: espalhamento de rede ou por fônons, por impurezas ionizadas, portador-portador e por impurezas neutras. A seguir, serão apresentados os espalhamentos e suas respectivas dependências com a temperatura.

- Espalhamento de rede ou por fônons (*lattice scattering* - μ_{ps}):

Este mecanismo está relacionado com a interação entre os portadores e as vibrações na rede cristalina, que são os fônons. Tais vibrações diminuem com a redução da temperatura, aumentando a mobilidade. Para os elétrons, esse espalhamento pode ser descrito através do modelo de Sah *et al* [51]:

$$\mu_{pse} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\mu_{0ea} \left(\frac{T}{300} \right)^{-\alpha_e}} + \frac{1}{\mu_{0eb} \left(\frac{T}{300} \right)^{-\beta_e}} \right)} \quad (2.33)$$

onde $\mu_{0ea} = 4195 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_{0eb} = 2153 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\alpha_e = 1,5$ e $\beta_e = 3,13$. Para o caso das lacunas, o índice e deve ser substituído por h e os coeficientes são dados por $\mu_{0ha} = 2502 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_{0hb} = 591 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\alpha_h = 1,5$ e $\beta_h = 3,25$. Neste modelo a combinação dos fônons ópticos e acústicos é feita pela regra de Mathiessen [4].

- Espalhamento por impurezas ionizadas (*ionized impurity scattering* - μ_{psii}):

Este mecanismo se refere à diminuição da mobilidade dos portadores devido à alta concentração de dopantes. O modelo empírico de Caughey e Thomas [52] considera os mecanismos de espalhamento por rede e por impurezas ionizadas em uma única equação, dada por:

$$\mu_{psie} = \mu_{\min,e} + \frac{\mu_{pse} - \mu_{\min,e}}{1 + \left(\frac{N_A^-}{N_{ref,e}} \right)^{\alpha_{ae}}} \quad (2.34)$$

onde $\mu_{\min,e} = 197,17 - 45,505 \cdot \log(T)$; $N_{\text{ref},e} = 1,12 \cdot 10^{17} \left(\frac{T}{300}\right)^{3,2}$ e $\alpha_{ac} = 0,72 \left(\frac{T}{300}\right)^{0,065}$. Para as lacunas, o índice e deve ser substituído por h e os coeficientes são dados por:
 $\mu_{\min,h} = 110,9 - 25,597 \cdot \log(T)$; $N_{\text{ref},h} = 2,23 \cdot 10^{17} \left(\frac{T}{300}\right)^{3,2}$ e $\alpha_{ah} = \alpha_{ae}$.

- Espalhamento portador-portador (*carrier-to-carrier scattering* - μ_{cc}):

Este mecanismo apresenta grande influência em dispositivos que possuem alta densidade de portadores (quando esta se torna maior que a de dopantes) como transistores submicrométricos ou dispositivos de potência. Para um semiconductor com concentração de dopantes aceitadores o mecanismo é dado por [53]:

$$\mu_{cc} = \frac{2 \cdot 10^{17}}{\sqrt{N_A} \cdot \ln\left(1 + 8,28 \cdot 10^8 \cdot T^2 \cdot N_A^{-1/3}\right)} \quad (2.35)$$

Para um dispositivo com substrato tipo n, deve-se substituir N_A por N_D na equação (2.35).

- Espalhamento por impurezas neutras (*neutral-impurity scattering* - μ_{ni}):

Tal mecanismo está relacionado com as impurezas não ionizadas devido à baixa temperatura e tem influência na mobilidade apenas para concentrações de dopantes acima de 10^{18} cm^{-3} . Para elétrons, este mecanismo pode ser modelado por [54]:

$$\mu_{ni} = C_0 \left[\frac{2}{3} \sqrt{\frac{kT}{E_{ni,e}}} + \frac{1}{3} \sqrt{\frac{E_{ni,e}}{kT}} \right] \quad (2.36)$$

onde $C_0 = \left(\frac{2\pi^3 q^3 m_e^*}{5\epsilon_{Si} h^3 (N_A - N_A^-)} \right) 10^{-2}$ e $E_{ni,e} = 1,136 \cdot 10^{-19} \left(\frac{m_e^*}{m_0} \right) \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_{Si}} \right)^2$, sendo m_e^* a massa efetiva dos elétrons, m_0 a massa do elétron e ϵ_0 a permissividade do vácuo. Para o caso de lacunas deve-se substituir na equação (2.36) a massa efetiva dos elétrons pela das lacunas.

Esses mecanismos de espalhamento não dependem das tensões aplicadas, e combinados pela regra de Mathiessen, definem a mobilidade independente de campo elétrico μ_0 :

$$\mu_0 = \left(\frac{1}{\frac{1}{\mu_{psii}} + \frac{1}{\mu_{CC}} + \frac{1}{\mu_{ni}}} \right) \quad (2.37)$$

Pode-se observar na equação (2.37) que o mecanismo de espalhamento por rede dado por μ_{ps} não entra no cálculo de μ_0 , pois o termo μ_{psii} já considera tal espalhamento juntamente com o espalhamento por impurezas ionizadas.

A Figura 2.7 mostra as componentes da mobilidade que compõe a mobilidade independente de campo em função da temperatura para uma concentração de dopantes de 10^{17} cm^{-3} [55].

A Figura 2.8 mostra a mobilidade independente de campo em função da temperatura para diversas concentrações de dopantes. Pode-se observar que o ganho de mobilidade com a redução de “T” é maior para a menor concentração [55].

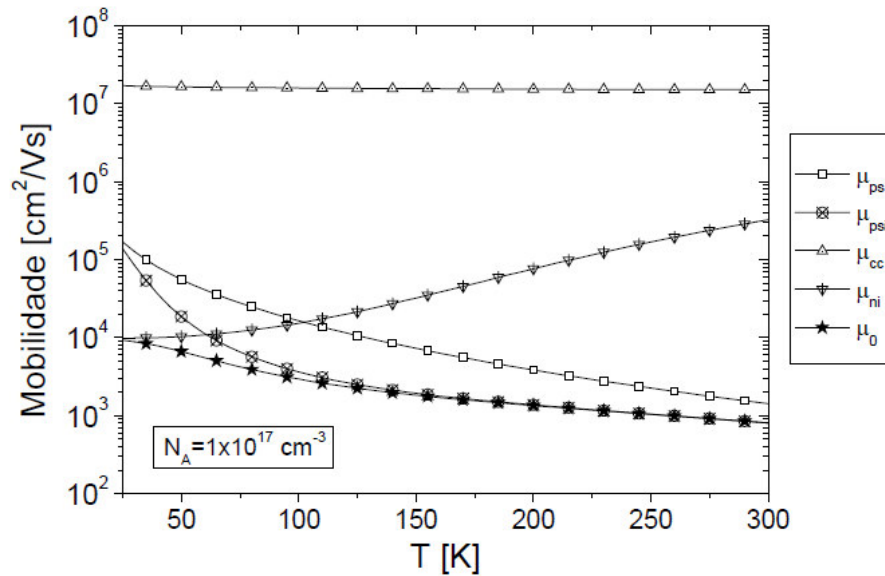


Figura 2.7 – Curva das componentes que compõe a mobilidade independente de campo em função da temperatura [55].

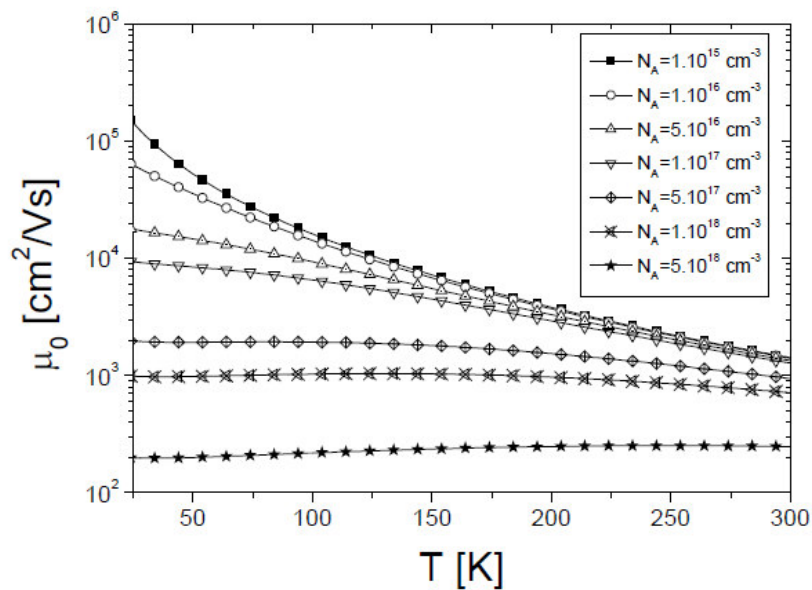


Figura 2.8 – Mobilidade independente de campo *versus* temperatura para diversas concentrações de dopantes [55].

A aplicação de tensão à porta gera um campo elétrico vertical que atrai os portadores para a interface silício/óxido, provocando uma diminuição da mobilidade devido à rugosidade da superfície [38]. O campo elétrico lateral também contribui para a diminuição da mobilidade, através da saturação da velocidade. Para um dispositivo SOI totalmente depletado, o campo

elétrico é menor em relação a um MOS convencional, reduzindo a degradação da mobilidade [18].

A mobilidade degradada pode ser expressa pela seguinte equação [56]:

$$\mu_{n,eff} = \frac{\mu_0}{1 + \alpha_S |E_{eff}|} \quad (2.38)$$

onde α_S é o coeficiente de espalhamento e E_{eff} é o campo elétrico efetivo nas direções vertical e horizontal.

A mobilidade dependente de campo ($\mu_{n,eff}$) apresenta uma dependência com a temperatura através do potencial de Fermi ϕ_F . Este potencial aumenta com a redução da temperatura, aumentando o campo elétrico efetivo e, conseqüentemente, aumentando a degradação da mobilidade [4].

2.4.2.3 Transcondutância

A transcondutância representa a eficácia do controle exercido pela tensão de porta sobre a corrente de dreno e é obtida por:

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \quad (2.39)$$

Quando o transistor opera em triodo, g_m pode ser expresso pela equação [38]:

$$g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{DS} \quad (2.40)$$

Já em saturação [38]:

$$g_m = \frac{\mu_n C_{ox}}{n} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) \quad (2.41)$$

onde n é o fator de corpo do transistor [38], que no caso de um dispositivo FinFET é muito próximo da unidade [44].

Como a corrente I_D é proporcional à mobilidade, a sua derivada em função de V_G também será proporcional. Assim, g_m possui uma dependência direta com a mobilidade e, portanto, também depende da temperatura.

2.4.2.4 Inclinação de Sublimiar

A inclinação de sublimiar (S) é definida pela variação na tensão de porta necessária a fim de se aumentar a corrente de dreno em uma década [38], sendo descrita por:

$$S = \frac{\partial V_{GS}}{\partial(\log(I_D))} \quad (2.42)$$

Como a componente predominante de corrente no sublimiar é a de difusão [15], pode-se obter que [57]:

$$S = n \frac{kT}{q} \ln(10) \quad (2.43)$$

O dispositivo SOI totalmente depletado apresenta fator de corpo (n) menor que o MOS convencional, apresentando, portanto, uma inclinação de sublimiar menor [1]. Já os transistores de múltiplas portas apresentam fatores de corpo muito próximos da unidade, fazendo com que a inclinação de sublimiar desses dispositivos se aproximem do valor mínimo teórico [44]. Pode-se perceber pela equação (2.43) que S é diretamente proporcional à temperatura. Assim, diminuindo a temperatura é esperada uma diminuição em S .

2.4.2.5 Efeitos de Canal Curto

Com a redução do comprimento do canal, as regiões de depleção de fonte e dreno se tornam mais significativas, gerando uma disputa com a região de depleção da porta pelo controle das cargas no canal [58]. Assim, a carga de depleção controlada pela porta será proporcionalmente menor para o dispositivo com canal curto em relação ao de canal longo.

Dessa forma, ocorre a diminuição da tensão de limiar e o aumento da inclinação de sublimiar para os dispositivos de canal curto.

As junções PN das regiões de fonte e dreno com o corpo do dispositivo estão reversamente polarizadas e as regiões de depleção associadas à elas aumentam conforme esta tensão reversa aumenta. Em um dispositivo de canal curto, o aumento da região de depleção no dreno, devido a uma tensão aplicada nele, pode induzir a redução da barreira de potencial na fonte que depende desta tensão. Já em um dispositivo de canal longo esta redução não ocorre. A redução desta barreira, que recebe o nome de DIBL (*Drain Induced Barrier Lowering*), provoca a diminuição das cargas controladas pela porta, reduzindo a tensão de limiar para valores altos de tensões aplicadas entre o dreno e a fonte [58].

A diminuição da temperatura diminui a porcentagem da carga total que sofre influência das regiões de depleção da fonte e do dreno reduzindo os efeitos de canal curto [59].

2.5 Aplicação de Tensão Mecânica

A aplicação de tensão mecânica tem sido utilizada como forma de aumentar a mobilidade dos portadores e, conseqüentemente, a corrente de dreno [7,8]. Esta técnica tem sido considerada como alternativa à constante miniaturização dos dispositivos que acaba por aumentar a degradação da mobilidade [1], quer pela maior concentração de dopantes no canal ou pela maior rugosidade de superfície em tecnologias mais modernas. A tensão mecânica pode ser tensora ou compressiva. A primeira é comumente utilizada em dispositivos nMOS pois aumenta a mobilidade dos elétrons, enquanto a segunda é utilizada em dispositivos pMOS.

A tensão mecânica pode ser aplicada de duas formas: uniaxialmente ou biaxialmente. No segundo caso, a tensão é aplicada nos dois eixos que formam o plano do substrato (comprimento e largura do dispositivo), enquanto que no primeiro a tensão é aplicada apenas no eixo da direção do comprimento do canal.

2.5.1 Formação da Tensão Mecânica

Uma das formas de gerar a tensão mecânica uniaxial é através da dilatação térmica. Quando se deposita um certo material sobre outro diferente em uma alta temperatura e, na seqüência, essa temperatura é reduzida, a tensão mecânica será gerada devido à diferença entre os coeficientes de dilatação térmica.

A Figura 2.9 mostra um diagrama esquemático da geração da tensão mecânica uniaxial.

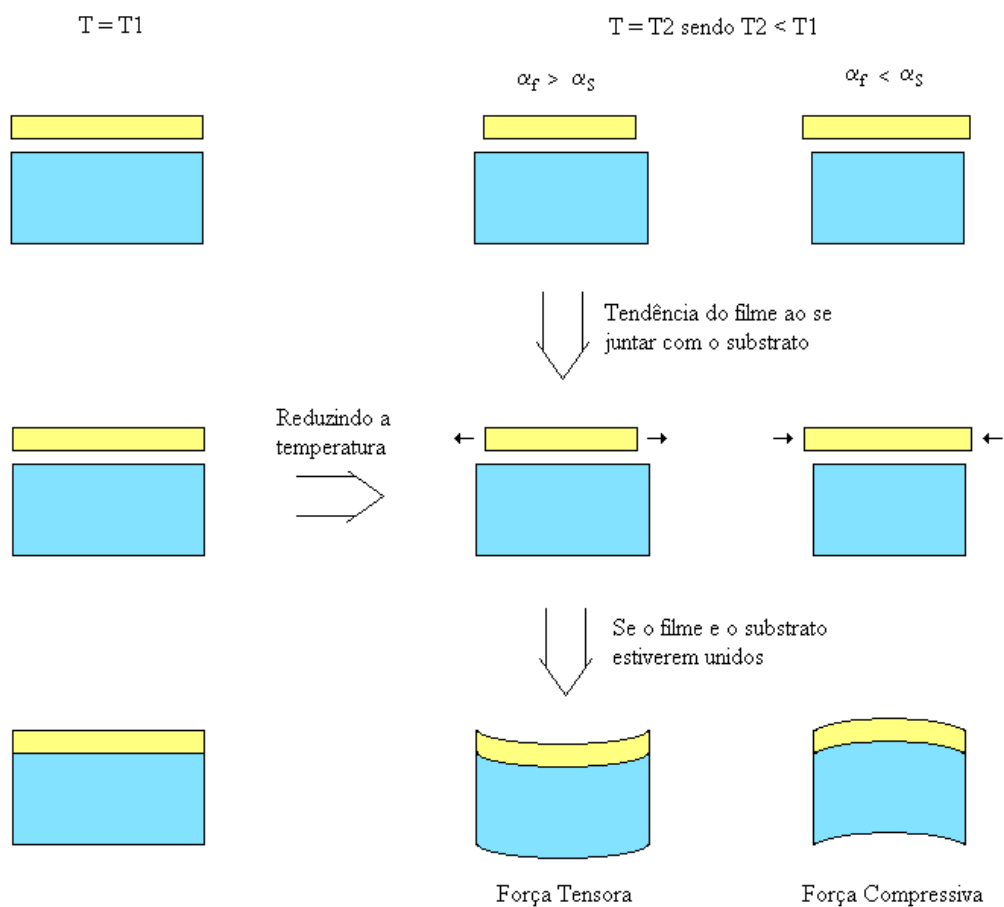


Figura 2.9 – Diagrama esquemático da geração de tensão uniaxial

No caso de um substrato com um coeficiente de dilatação térmica α_s e um filme com coeficiente α_f , sendo este segundo maior que o primeiro ($\alpha_f > \alpha_s$), se esses materiais estivessem separados, ao reduzir a temperatura, o filme se contrairia mais que o substrato. Quando os materiais estão unidos, o filme não consegue se contrair da mesma forma que quando os

materiais estão separados [60,61]. Dessa forma, é como se houvesse uma força tensora, que não permite que o material se contraia. Já para o caso do coeficiente do filme ser menor que o do silício, ocorrerá o inverso e a força será compressiva. Esta forma de tensão geralmente é aplicada utilizando uma camada de nitreto de silício Si_3N_4 (*strained Contact Etch Stop Layer - sCESL*) sobre a região de porta do transistor [11,62].

A tensão mecânica biaxial é gerada pela estrutura cristalina. Para gerar essa forma de tensão, é utilizada uma camada de silício sobre a liga silício/germânio ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$). Inicialmente, tem-se uma camada de silício no substrato. Então, é feito o crescimento gradual da liga SiGe até um valor $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Na sequência é feito o crescimento epitaxial de silício que terá a mesma distância interatômica que a camada de SiGe. Assim, esta camada sofrerá uma pressão mecânica tensora biaxial [63]. A Figura 2.10 mostra esquematicamente a formação da camada tensionada biaxialmente.

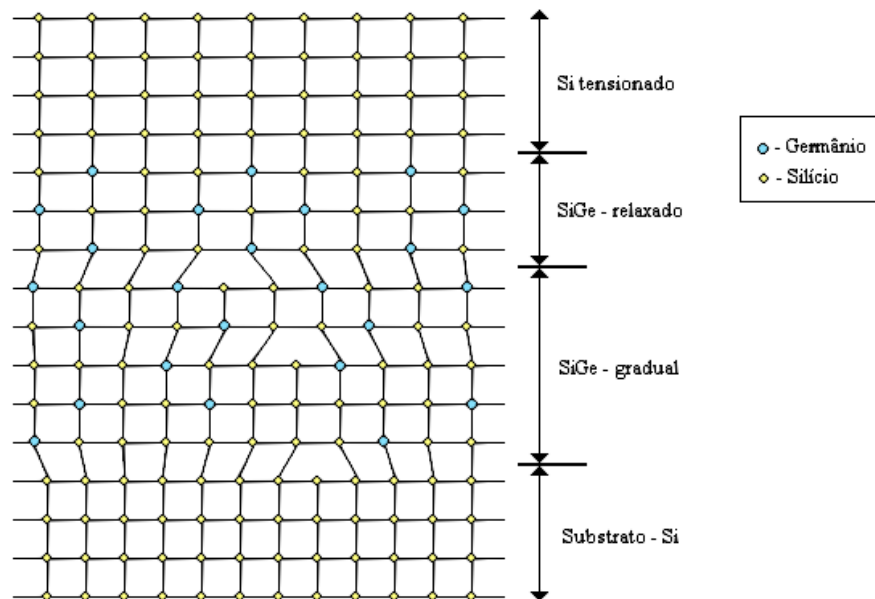


Figura 2.10 – Formação da tensão mecânica biaxial através da utilização de ligas SiGe.

Haverá, então, uma deformação no filme de silício (ϵ_{filme}) devido ao descasamento das distâncias interatômicas, que é dado por [64]:

$$\epsilon_{\text{filme}} = \frac{a_{\text{sub}} - a_{\text{filme}}}{a_{\text{sub}}} \quad (2.44)$$

onde a_{sub} e a_{filme} são os espaçamentos cristalinos do substrato e do filme, respectivamente. Para o silício o espaçamento a_{filme} é dado por 0,5431nm, enquanto que para a liga $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ a constante a_{sub} é dada, em função da concentração de germânio, pela aproximação quadrática [65]:

$$a_{\text{sub}}(x) = 0,002733x^2 + 0,01992x + 0,5431 \quad [\text{nm}] \quad (2.45)$$

A tensão mecânica na camada será dada por [64]:

$$\sigma = -2\gamma \frac{\nu + 1}{\nu - 1} \varepsilon_{\text{filme}} \quad (2.46)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson, que representa a razão entre a deformação lateral e longitudinal, γ é o módulo de elasticidade transversal que pode ser dado por $\gamma = \frac{E}{2(1+\nu)}$, onde E é o módulo de Young ou módulo de elasticidade que é definido como a razão entre a tensão mecânica e a deformação.

Para o silício, de acordo com a ref. [66], tem-se que $E = 130,1\text{GPa}$ e $\nu = 0,278$ na direção (100), pois devido à anisotropia do silício, ele apresenta diferentes constantes nas direções (100), (110) e (111).

Para o caso de uma liga $\text{Si}_{0,9}\text{Ge}_{0,1}$, pelas equações (2.45) e (2.44) tem-se uma deformação $\varepsilon_{\text{filme}} = 3,72 \times 10^{-3}$. Dessa forma, a tensão mecânica na camada de silício pela equação (2.46) será de aproximadamente 670 MPa. Já, para uma liga $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$, a tensão esperada é de 1,35 GPa.

Para se aplicar esta técnica de tensão em tecnologia SOI, a estrutura da Figura 2.10 é unida à outra lâmina com uma camada espessa de óxido (lâmina SOI) [67]. Então, as camadas com a liga SiGe são removidas restando apenas o silício tensionado sobre a lâmina SOI, que também pode ser chamado de SSDOI (*strained silicon directly on insulator*), como ilustra esquematicamente a Figura 2.11.

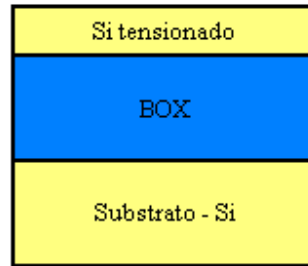


Figura 2.11 – SSDOI (*Strained Silicon Directly on Insulator*)

2.5.2 Piezoresistência

Ao se aplicar uma tensão mecânica em um material, há uma mudança em sua resistência elétrica. Essa mudança é causada por alterações nas dimensões e na resistividade [68]. A razão entre a variação de resistência (ΔR) e a resistência inicial (R_0) do material, no caso de uma tensão uniaxial, é dada por [68]:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = (1 + 2\nu)\epsilon_1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \quad (2.47)$$

onde ϵ_1 é a deformação longitudinal, $\Delta\rho$ é a variação da resistividade e ρ_0 é a resistividade sem a aplicação de tensão mecânica.

No caso do silício e do germânio, o termo relacionado com as alterações dimensionais é bem menor que o da resistividade [68]. Assim, a razão $\Delta R/R_0$ é aproximada por:

$$\frac{\Delta R}{R_0} \cong \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \quad (2.48)$$

A variação da resistividade, em uma aproximação de primeira ordem, pode ser considerada proporcional à tensão mecânica [68]:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \Pi \sigma \quad (2.49)$$

onde Π é a matriz dos coeficientes piezoresistivos e σ é o vetor de tensão mecânica.

Devido à simetria cúbica do cristal do silício, tem-se que Π é uma matriz 6 x 6 com apenas três coeficientes independentes [68]. Considerando que os eixos do sistema de tensão mecânica coincidem com os eixos do cristal:

$$\Pi = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{pmatrix}$$

O vetor σ possui seis componentes: σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , σ_{23} , σ_{13} e σ_{12} que representam, respectivamente, as componentes σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{yz} , σ_{xz} e σ_{xy} , conforme apresentado na Figura 2.12. Pode-se notar que no cubo existem nove componentes de tensão, enquanto que no vetor σ são seis. Isso ocorre, pois devido à simetria do cristal do silício as componentes σ_{zy} , σ_{zx} e σ_{yx} são iguais a σ_{yz} , σ_{xz} e σ_{xy} , respectivamente.

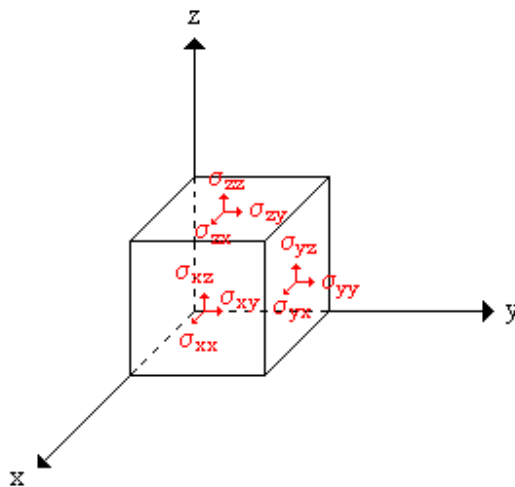


Figura 2.12 – Representação das componentes da tensão mecânica.

A Figura 2.13 ilustra as componentes σ_{yy} e σ_{xy} da tensão mecânica. Quando os dois índices são iguais (Figura 2.13(A)), uma força é aplicada na direção de um vetor normal à uma determinada superfície e a deformação é obtida pela variação do comprimento naquela direção [69]. Quando os dois índices são diferentes (Figura 2.13(B)), uma força é aplicada na direção no segundo índice em uma superfície normal ao primeiro índice [69]. Por exemplo na Figura 2.13(B), a força σ_{xy} é aplicada na direção “y” em uma superfície cujo vetor normal está na direção “x”. Neste caso, a deformação é obtida pelo ângulo ϕ , conforme apresentado na figura.

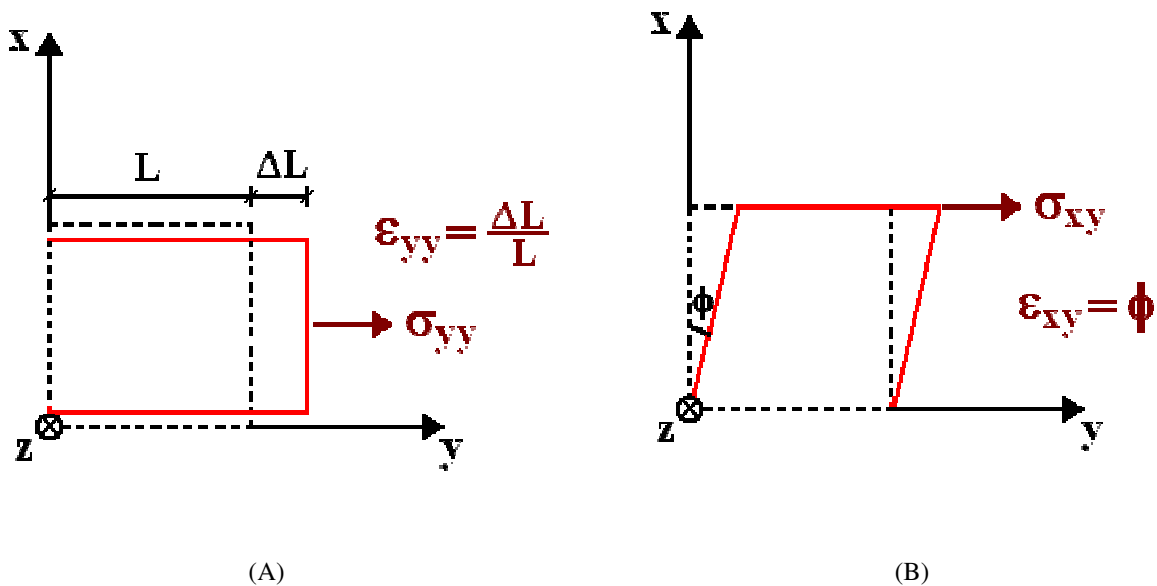


Figura 2.13 – Ilustração das componentes σ_{yy} (A) e σ_{xy} (B) da tensão mecânica.

A variação relativa da mobilidade será dada por [70]:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} \cong -\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = -\Pi\sigma \quad (2.50)$$

Dessa forma, o efeito da aplicação de tensão mecânica na mobilidade pode ser contabilizado através dos coeficientes piezoresistivos.

2.5.3 Relação entre Tensão Mecânica e Deformação

A relação entre a tensão mecânica e a deformação no cristal é dada pela lei de Hook:

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^6 F_{ij} \sigma_j \quad (2.51)$$

onde F_{ij} é a constante elástica de flexibilidade. Devido à simetria cúbica do silício, caso o sistema de coordenadas esteja sobre o eixo de simetria do cristal [71], F será dado por:

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{12} & 0 & 0 & 0 \\ F_{12} & F_{11} & F_{12} & 0 & 0 & 0 \\ F_{12} & F_{12} & F_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{44} \end{bmatrix}$$

onde, de acordo com a ref. [72], os coeficientes são dados por $F_{11} = 0,77 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dina}$, $F_{12} = -0,21 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dina}$ e $F_{44} = 1,25 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dina}$.

O vetor σ possui seis componentes, conforme descrito no item 2.5.2. Considerando apenas as componentes normais aos eixos do cristal, ou seja, apenas as componentes σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} , somente os três primeiros termos da equação (2.51) serão utilizados (j variando de 1 a 3). Dessa forma, a equação (2.51) pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{12} \\ F_{12} & F_{11} & F_{12} \\ F_{12} & F_{12} & F_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

2.5.4 Dependência da Tensão Mecânica Biaxial nas Dimensões dos Dispositivos

Os dispositivos fabricados sob tensão mecânica biaxial não apresentam uma distribuição uniforme da mesma ao longo de seu canal. A distribuição de tensão mecânica depende das dimensões dos dispositivos e se torna mais efetiva à medida que essas dimensões aumentam [73].

A Figura 2.14 mostra a variação da tensão mecânica na direção da largura de uma camada de silício e mostra que há um relaxamento na tensão mecânica nesta direção [74]. A distribuição da tensão mecânica apresentada nesta figura foi obtida após a isolamento MESA por meio de simulação em uma camada sSOI com 1,5 GPa de tensão mecânica biaxial [74]. Este relaxamento ocorre principalmente nos primeiros 100 nm a partir da interface lateral. Na referência de onde esta figura foi extraída, o dispositivo em estudo é um transistor SOI planar totalmente depletado.

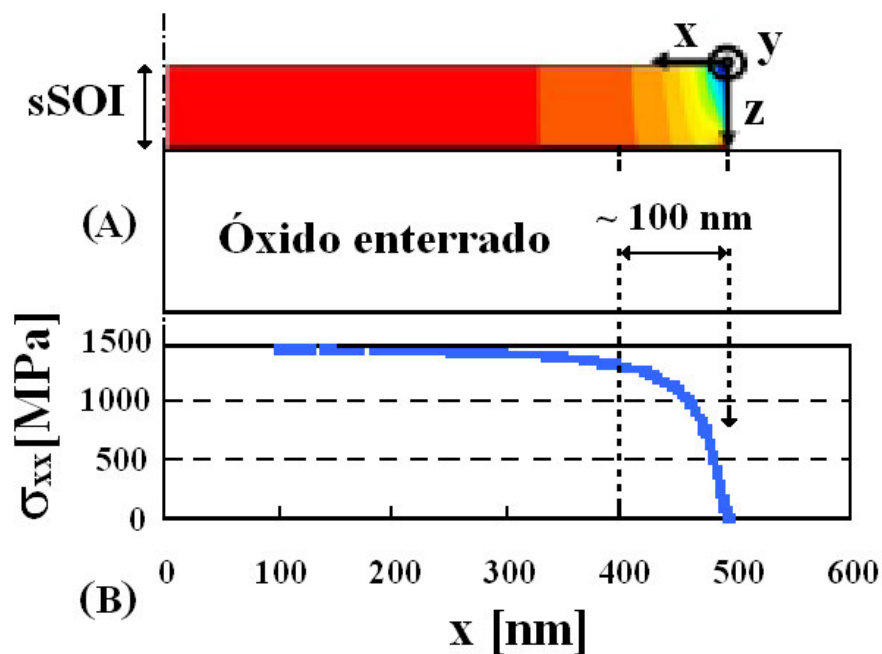


Figura 2.14 – Variação da tensão mecânica na direção da largura de uma ilha de silício em uma distribuição 2D (A) e em uma distribuição 1D à 1 nm abaixo do óxido de porta (B) de acordo com a ref. [74].

A ref. [74] ainda mostra que, diminuindo-se a largura do dispositivo, há uma variação na tensão mecânica tanto na direção da largura do canal como na direção do comprimento do mesmo.

2.5.5 Efeitos na Estrutura de Faixas de Energia

A faixa de condução do silício não tensionado possui seis vales de mesma energia. A massa efetiva é obtida pelas contribuições dos vales considerando as massas longitudinal e transversal. Quando uma tensão biaxial é aplicada no plano λ , há uma divisão nos níveis energéticos diminuindo a energia dos dois vales (Δ_2) que estão fora do plano (Figura 2.15) e aumentando dos quatro vales que estão no plano (Δ_4) (Figura 2.15). Assim, ocorre uma redistribuição dos elétrons que passam a ocupar preferencialmente os vales Δ_2 , que apresentam uma massa de transporte transversal menor. Assim, a massa efetiva dos portadores diminui [75,76]. Como a mobilidade é dada por $\mu = q\tau/m'$ [77], onde τ é o tempo de vida dos portadores e m' é a massa efetiva dos mesmos, a redução na massa provoca um aumento na mobilidade.

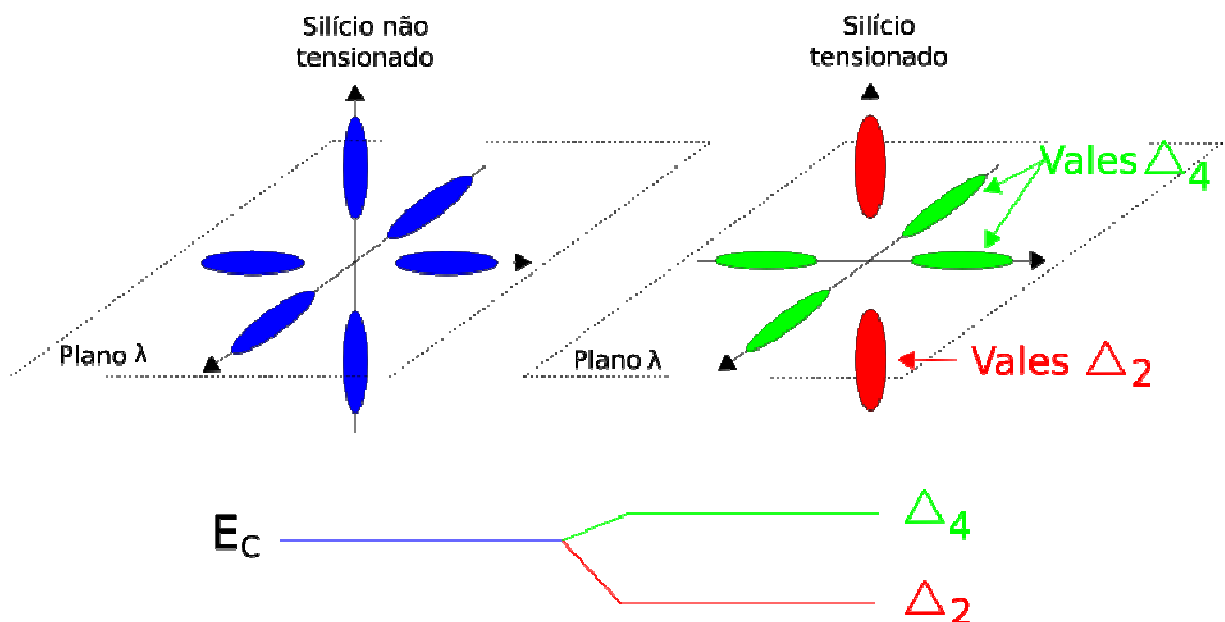


Figura 2.15 – Efeito da aplicação de tensão mecânica na banda de condução do silício

A divisão dos níveis energéticos também ocorre na faixa de valência, sendo que seu nível mais alto será preferencialmente utilizado pelas lacunas aumentando a mobilidade destas. Esta divisão na banda de valência diminui com a aplicação de um intenso campo elétrico vertical devido ao efeito de confinamento quântico [76].

Com o aumento da banda de valência e a redução da banda de condução, a largura de banda proibida diminui, reduzindo a tensão de limiar. A variação na tensão de limiar de um nMOSFET com uma pressão biaxial tensora (σ) é dada por [78,79]:

$$q \Delta V_{TH}(\sigma) = \Delta E_c(\sigma) + (n-1) \left[\Delta E_g(\sigma) + kT \ln \frac{N_V(0)}{N_V(\sigma)} \right] \quad (2.53)$$

onde ΔE_c é a alteração na banda de condução induzida pela tensão σ , n é o coeficiente do efeito de corpo, ΔE_g é a redução na largura de banda proibida, $N_V(0)$ e $N_V(\sigma)$ são as densidades de estados na banda de valência com e sem a aplicação de tensão, respectivamente.

A aplicação de tensão uniaxial também provoca alterações do diagrama de faixas de energia reduzindo a massa efetiva e, por conseqüência aumentando a mobilidade [80]. A variação na tensão de limiar é similar à da tensão biaxial, sendo dada pela fórmula (2.53) com o termo $\Delta E_c(\sigma) = 0$. Dessa forma, por não apresentar esse termo e como a variação da largura da banda proibida é menor que para a tensão biaxial, a redução na tensão de limiar é menor no caso uniaxial [78].

2.5.6 Modelo de Mobilidade dos Elétrons devido à Redistribuição dos Portadores

Uma forma de se obter os efeitos da tensão mecânica na mobilidade dos elétrons, é através da redistribuição dos portadores nas bandas de energia. Conforme foi mencionado no item 2.5.5, quando uma tensão mecânica biaxial é aplicada, os elétrons passam a ocupar os vales $\Delta 2$, que estão fora do plano (onde é aplicada a tensão mecânica), sendo que estes vales possuem uma massa de transporte transversal menor, reduzindo a massa efetiva dos portadores e aumentando a mobilidade. Esta redistribuição dos portadores reduz o espalhamento entre vales que também aumenta a mobilidade.

O modelo descrito pela referência [81] está relacionado com a deformação na estrutura de bandas [72,82,83]. Este modelo considera apenas os elementos da diagonal principal da matriz de mobilidade, sendo a mobilidade dada por:

$$\mu_{n,ii} = \mu_{n0} \left[1 + \frac{1 - \frac{m_{nl}}{m_{nt}}}{1 + 2 \frac{m_{nl}}{m_{nt}}} \left(\frac{F_{1/2} \left(\frac{F_n - E_c - \Delta E_{c,i}}{kT} \right)}{F_{1/2} \left(\frac{F_n - E_c - \Delta E_c}{kT} \right)} - 1 \right) \right] \quad (2.54)$$

onde μ_{n0} é a mobilidade dos elétrons sem a aplicação de tensão mecânica, m_{nl} e m_{nt} são as massas longitudinal e transversal em um sub-vale de energia, respectivamente, $\Delta E_{c,i}$ é um termo adicional relacionando a deformação de cisalhamento ao nível da energia de condução descrito pela referência [84], F_n é o nível de quase-Fermi dos elétrons e o índice i corresponde a direção no eixo do cristal. Se i representar o eixo x , o termo $\Delta E_{c,i}$ será calculado para os dois sub-vaies ao longo desse eixo.

A fim de se considerar o espalhamento entre vaies, tem-se que a mobilidade será dada por [14, 85]:

$$\mu_{n,ii} = \frac{3\mu_{n0}}{1 + 2 \frac{m_{nl}}{m_{nt}}} \frac{\frac{\tau_i}{\tau_0} F_{1/2} \left(\frac{\eta - \Delta E_{c,i}}{kT} \right) + \frac{\tau_j}{\tau_0} \frac{m_{nl}}{m_{nt}} F_{1/2} \left(\frac{\eta - \Delta E_{c,j}}{kT} \right) + \frac{\tau_l}{\tau_0} \frac{m_{nl}}{m_{nt}} F_{1/2} \left(\frac{\eta - \Delta E_{c,l}}{kT} \right)}{F_{1/2} \left(\frac{\eta - \Delta E_{c,i}}{kT} \right) + F_{1/2} \left(\frac{\eta - \Delta E_{c,j}}{kT} \right) + F_{1/2} \left(\frac{\eta - \Delta E_{c,l}}{kT} \right)} \quad (2.55)$$

onde τ_0 representa o tempo total de relaxamento sem a aplicação de tensão mecânica, τ_i é o tempo total de relaxamento nos sub-vaies da direção i no silício tensionado e η é a diferença entre o nível de quase-Fermi dos elétrons e a energia de condução ($F_n - E_c$).

Este modelo, que considera a dependência da concentração de dopantes no espalhamento e na redistribuição dos portadores, está implementado no simulador Sentaurus e foi utilizado nas simulações.

3 SIMULADORES

Para se efetuarem as simulações numéricas tridimensionais dos dispositivos, foram utilizadas as ferramentas da Silvaco e da Synopsys, sendo o Devedit [86] e o Atlas [13] da primeira e o *Sentaurus Device* [14] da segunda, respectivamente. Neste capítulo será feita uma breve introdução dos mesmos, seguida da descrição dos modelos utilizados e, por fim, dos resultados obtidos.

O Devedit é um programa para geração de estrutura de dispositivos. Ele pode ser utilizado pelo modo gráfico (apenas em ambiente Linux) ou em modo texto através do *Deckbuild* [87]. Já o Atlas é o simulador tridimensional utilizado para descrever o comportamento dos dispositivos gerados no Devedit. Os comandos de ambos os programas foram utilizados juntos num mesmo arquivo de texto para serem editados no *Deckbuild*.

De forma semelhante às ferramentas da Silvaco, foram utilizadas as ferramentas da Synopsys, sendo que estas funcionam em ambiente Linux. Neste caso, para gerar a estrutura foi utilizado o programa SDE (*Structure Device Editor*) [88], que também pode ser executado tanto no modo gráfico como no modo texto. No trabalho atual este programa foi utilizado em modo texto, sendo executado diretamente a partir de um *script* no modo terminal. Para a simulação de dispositivos é utilizado o SDEVICE (*Sentaurus Device*) [14].

Ambos os programas Atlas e SDEVICE utilizam o método dos elementos finitos para o cálculo das equações de Poisson e da continuidade além de modelos analíticos para os diversos efeitos que podem ocorrer nos dispositivos, tais como degradação da mobilidade pelo campo elétrico paralelo e transversal, ionização incompleta das impurezas aceitadoras em baixa temperatura, entre outros. Assim, se faz necessário passar ao simulador, no arquivo de entrada, quais são os modelos que devem ser utilizados nas simulações.

No *Deckbuild*, é utilizado um arquivo de extensão “.in” de texto que contém todos os comandos a serem executados de forma seqüencial, tanto do Devedit como do Atlas. Um exemplo de arquivo de simulação encontra-se no Apêndice A deste trabalho. Neste arquivo são descritos todos os comandos utilizados para gerar a estrutura, os perfis de dopagem, os modelos utilizados e as tensões aplicadas aos contatos. A alteração de parâmetros dos modelos utilizados também é feita nesse arquivo.

Na simulação utilizando o Sentaaurus, são utilizados dois arquivos de texto diferentes para gerar a estrutura e para simular o dispositivo. O programa SDE em modo texto utiliza um *script* “.scm” com os comandos para geração da estrutura incluindo os perfis de dopagem bem como da grade. Este programa, então, salva um ou dois arquivos para a grade e a estrutura juntas ou separadas. No caso da grade e estrutura juntas é utilizado um arquivo “.tdr”, enquanto que no caso de separados os arquivos são “.dat” para a estrutura e “.grd” para a grade.

Na simulação de dispositivos no SDEVICE, os comandos são escritos em um arquivo “.cmd”. Neste arquivo devem estar especificados os arquivos de entrada da grade e da estrutura (se ambos estiverem salvos no mesmo arquivo “.tdr” deve-se entrar duas vezes com o mesmo nome) e também podem ser especificados outros arquivos de entrada como o arquivo “.par” utilizado nas modificações dos parâmetros dos modelos. Neste arquivo são especificados os modelos a serem utilizados e as tensões elétricas que devem ser aplicadas. Os exemplos de arquivo .scm e .cmd para a simulação no Sentaaurus encontram-se no apêndice B.

O desenvolvimento do trabalho foi iniciado com os programas da Silvaco. No entanto, foi necessário haver uma migração de programa devido ao fato do Atlas não ser capaz de contabilizar os efeitos de tensão mecânica aplicada. Dessa forma, passou-se a utilizar o Sentaaurus.

3.1 Modelos Utilizados

Nesta seção serão detalhados os modelos utilizados nas simulações Atlas e Sentaaurus, respectivamente.

3.1.1 Modelos Utilizados no ATLAS

Os modelos utilizados nas simulações Atlas são:

- BGN (*Band Gap Narrowing*): considera o estreitamento da largura de faixa proibida, sendo importante em regiões com altas concentrações de dopantes. É utilizado para a modelagem do transistor bipolar parasitário intrínseco ao transistor SOI.

- CONSRH (*Concentration Dependent Lifetime SRH*): considera a dependência do tempo de vida dos portadores com a concentração de dopantes. É recomendado para estruturas de silício.
- FERMI (Fermi - Dirac): aproximação estatística da redução da concentração de portadores em regiões altamente dopadas.
- AUGER: modelo de recombinação pela transição direta de portadores. É importante em altas densidades de corrente.
- CVT (Lombardi): modelo de mobilidade que inclui as dependências com a concentração de dopantes, temperatura e campo elétrico vertical e horizontal.
- FLDMOB (*Parallel Electric Field Dependence*): modelo de degradação da mobilidade que considera o efeito do campo elétrico lateral. É ativado automaticamente ao se utilizar o modelo CVT.
- INCOMPLETE: considera a ionização incompleta das impurezas com a redução da temperatura.
- IONIZ: usado como complemento do modelo INCOMPLETE, considerando ionização completa em silício com alta concentração de dopantes.

3.1.2 Modelos Utilizados no *Sentaurus Device*

Os modelos utilizados nas simulações *Sentaurus Device* são:

- PhuMob (*Philips Unified Mobility Model*): modelo de mobilidade proposto por Klaassen [89]. Unifica a descrição das mobilidades dos portadores majoritários e minoritários. Considera a dependência com a temperatura bem como os mecanismos de degradação da mobilidade devido aos espalhamentos por impurezas e portador-portador. É idêntico ao modelo KLA implementado no Atlas.
- Lombardi: modelo de degradação de mobilidade nas interfaces, considerando os mecanismos de espalhamento por fônons acústicos e pela rugosidade na superfície. Para tal, é utilizado o campo elétrico transversal. Inclui as dependências com a concentração de dopantes e temperatura. É idêntico ao modelo CVT no Atlas.

- *Canali Model*: modelo que contabiliza a velocidade de saturação dos portadores em alto campo elétrico, considerando a dependência com a temperatura. Seria o equivalente ao modelo FLDMOB no Atlas.
- *Incomplete Ionization*: considera a ionização incompleta das impurezas ao se reduzir a temperatura. Semelhante ao modelo INCOMPLETE no Atlas. No entanto, para considerar ionização completa quando a concentração de dopantes for alta, é necessário modificar o parâmetro “NdCrit”. Nas simulações, o valor deste parâmetro foi alterado de 10^{22} cm^{-3} para $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Esta modificação, que é feita através do arquivo “.par”, seria o equivalente ao modelo IONIZ no Atlas.
- SRH: modelo de recombinação SRH. Foram colocados os argumentos “DopingDependence” e “TempDependence” no modelo, a fim de se considerar as dependências com a concentração de dopantes e a temperatura, respectivamente. Seria o equivalente ao modelo CONSRH no Atlas.
- *BandGap Narrowing (OldSlotboom)*: é o modelo para o estreitamento da faixa proibida de energia, sendo equivalente ao modelo BGN no Atlas. *OldSlotboom* indica os valores dos parâmetros que serão utilizados.
- *Density Gradient Quantization Model*: modelo que considera os efeitos quânticos no funcionamento dos dispositivos. Acrescenta uma variável relacionada com tais efeitos através de derivadas parciais na fórmula clássica da densidade dos portadores. Este modelo foi utilizado nas simulações dos dispositivos menores que 20 nm de largura do *fin*. Também foi utilizado em algumas das simulações de dispositivos de 20 nm e 30 nm, apenas para efeito comparativo na concentração de portadores e na tensão de limiar.
- *Deformation Potential*: modelo de potencial de deformação utilizado para levar em consideração o efeito da deformação do cristal de silício nos sub-vales de energia do material. Assim, considera o efeito da deformação nas energias de valência e condução. Foi utilizado nas simulações sob o efeito de tensão mecânica.
- *Strained effective Mass and DOS*: considera o efeito da deformação do cristal nas massas efetivas de elétrons e das lacunas, alterando também a densidade de estados nas bandas de condução e valência. Também foi utilizado nas simulações com tensão mecânica.
- *Stress-Induced Electron Mobility Model*: considera o efeito da tensão mecânica na mobilidade dos elétrons através das mudanças nos sub-vales de energia e na massa

efetiva. Neste modelo foram utilizados os argumentos *Doping* e *Scattering* que considera a equação (2.55) descrita no item 2.5.6.

3.2 Dispositivos Simulados

3.2.1 Dispositivos Simulados no ATLAS

Os dispositivos simulados no ATLAS são transistores FinFETs com altura $H_{Fin} = 60$ nm, espessura de óxido de porta $t_{ox} = 2$ nm, espessura da camada de óxido enterrado $t_{box} = 100$ nm, concentração de dopantes $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, comprimento de canal $L_{Fin} = 910$ nm e função trabalho do material de porta de 4,7 eV. A função trabalho do substrato foi adotada como a função trabalho do silício com concentração de impurezas aceitadoras de $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, que resulta em aproximadamente 4,95 eV. As simulações foram efetuadas para diversas larguras do *fin* entre 20 nm e 50 nm, bem como para a temperatura variando entre 100 K e 400 K.

Como estes dispositivos apresentam mobilidades diferentes dependendo da orientação cristalográfica do plano de condução, foi considerada a diferença entre as mobilidades conforme proposto na ref. [90]. Desta forma, o *fin* foi dividido em três regiões, sendo duas trapezoidais nas laterais e uma triangular no topo, conforme apresenta a Figura 3.1, adotando-se parâmetros diferentes no modelo CVT para as regiões. Assim, foi considerada uma degradação de mobilidade maior nas laterais que no topo. Os parâmetros utilizados encontram-se na Tabela 3.1. Esses parâmetros foram determinados de acordo com a ref. [90].

Tabela 3.1 – Parâmetros do modelo CVT modificados

| Região | BN.CVT [cm ² /(V. s)] | CN.CVT | DELN.CVT [cm ² /(V. s)] | FELN.CVT [cm ² /(V. s)] |
|----------|-------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Superior | $4,7 \times 10^7$ | $1,74 \times 10^5$ | $5,82 \times 10^{14}$ | $1,0 \times 10^{50}$ |
| Lateral | $1,0 \times 10^7$ | $1,28 \times 10^5$ | $3,50 \times 10^{14}$ | $0,2 \times 10^{50}$ |

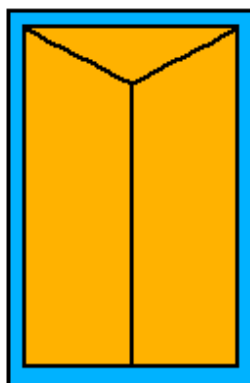


Figura 3.1 – Divisão do *fin* considerando mobilidades diferentes entre as superfícies laterais e superior.

3.2.2 Dispositivos Simulados no *Sentaurus Device*

Os dispositivos simulados no Sentaurus Device apresentam dimensões semelhantes aos transistores simulados no Atlas. Possuem altura $H_{Fin} = 60$ nm, espessuras dos óxidos de porta e do substrato de $t_{ox} = 2$ nm e $t_{box} = 100$ nm, respectivamente, concentração de dopantes de $N_A = 10^{15}$ cm⁻³ e funções trabalho dos materiais de porta e substrato de 4,7 eV e 4,95 eV, respectivamente. O comprimento de canal varia entre 50 nm e 1 μm, enquanto a largura do *fin* varia entre 5 nm e 1 μm e a temperatura entre 100 K e 400 K.

Também foi utilizada a mesma estrutura apresentada na Figura 3.1. Dessa forma, o transistor é dividido em três regiões, sendo considerados coeficientes diferentes nas degradações da mobilidade entre a porta superior e as laterais a fim de se simular as diferenças cristalográficas.

Os parâmetros alterados são os mesmos do Atlas, uma vez que é utilizado o mesmo modelo de degradação da mobilidade, ainda que possuam nomes diferentes. Os parâmetros alterados se encontram na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros alterados no modelo Lombardi para a degradação da mobilidade dos elétrons.

| Região | B [cm/s] | C [cm ^{5/3} /(V ^{2/3} . s)] | delta [cm ² /(V . s)] | eta [V ² /(cm . s)] |
|----------|-----------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Superior | 4,7 x 10 ⁷ | 580 | 5,82 x 10 ¹⁴ | 1,0 x 10 ⁵⁰ |
| Lateral | 1,0 x 10 ⁷ | 427 | 3,50 x 10 ¹⁴ | 0,2 x 10 ⁵⁰ |

Pode-se notar que os coeficientes CN.CVT e C apresentam valores diferentes. Isso ocorre pois os modelos são implementados com uma pequena diferença. O termo que possui tal coeficiente no Atlas é dividido pela temperatura absoluta enquanto que no Sentaurus este mesmo termo é dividido pela temperatura normalizada. Assim, ao se dividir o coeficiente do Atlas por 300 K, pode-se obter o coeficiente de SDEVICE.

A fim de se obter simulações similares entre o Atlas e o Sentaurus, os valores padrão de dois parâmetros dos modelos do Sentaurus foram alterados de acordo com os parâmetros do Atlas. São eles o “Eg0” e “Chi0” que foram alterados de 1,1696 eV e 4,05 eV para 1,1414 eV e 4,147 eV, respectivamente. Tais parâmetros dizem respeito à largura de banda proibida e afinidade do silício, alterando, portanto, a tensão de limiar dos dispositivos.

Por padrão, o Sentaurus considera que os eixos “x”, “y” e “z” do dispositivo simulado se encontram nas direções (100), (010) e (001), respectivamente [14]. No entanto, no caso de um dispositivo FinFET, o canal encontra-se na direção (110). Portanto, o eixo “y”, que é o eixo da direção do comprimento do canal, deve ser rotacionado em 45°, da posição (010) para a (110). O eixo “z” (direção da altura do *fin*) irá permanecer na mesma direção. O eixo “x” (direção da largura do *fin*) será rotacionado da posição (100) para a (1 -10). Dessa forma, os eixos “x” e “y” permanecem ortogonais. Essa rotação nos eixos é utilizada como forma de considerar a dependência da tensão mecânica na estrutura cristalina do silício, uma vez que os coeficientes piezoresistivos dependem da orientação cristalográfica.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos pelas simulações Atlas e Sentaurus, bem como os resultados medidos.

4.1 Estrutura de Simulação

Como o *fin* foi dividido em três regiões a fim de se considerar a orientação cristalográfica, foram analisados o potencial eletrostático e a concentração de elétrons, através do simulador Atlas, como forma de se garantir a continuidade entre as diferentes regiões de silício.

A Figura 4.1 mostra a densidade de elétrons em um dispositivo com $W_{Fin} = 20$ nm, $L_{Fin} = 1$ μ m em temperatura ambiente. O corte foi realizado na direção da largura do *fin* na metade do comprimento e da altura do mesmo para várias profundidades. As profundidades representam as distâncias entre a porta superior e o ponto onde foi realizado o corte. A Figura 4.2 apresenta o potencial eletrostático na direção da largura do *fin* no mesmo dispositivo e nas mesmas profundidades. Em ambas as figuras, a tensão V_{GS} foi de 1 V enquanto que V_{DS} foi de 50 mV. Pode-se observar que, apesar da divisão em três regiões, a continuidade tanto do potencial quanto da densidade de elétrons entre as regiões se mantém.

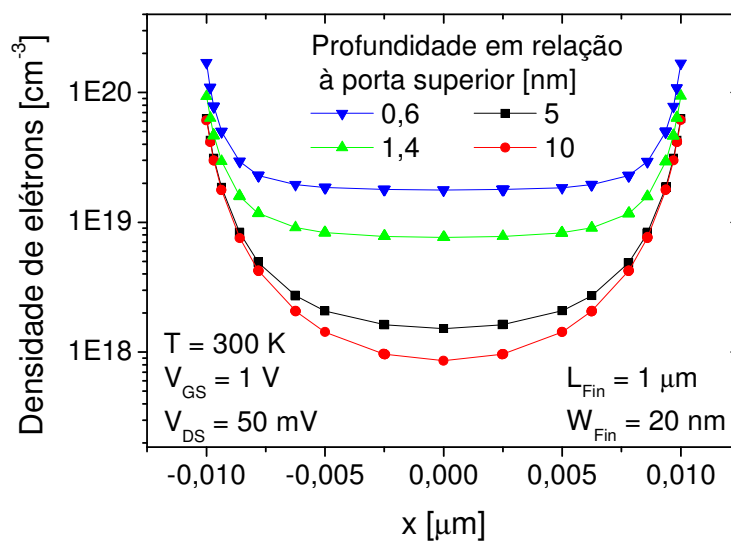


Figura 4.1 – Densidade de elétrons na direção da largura do *fin* em diversas profundidades.

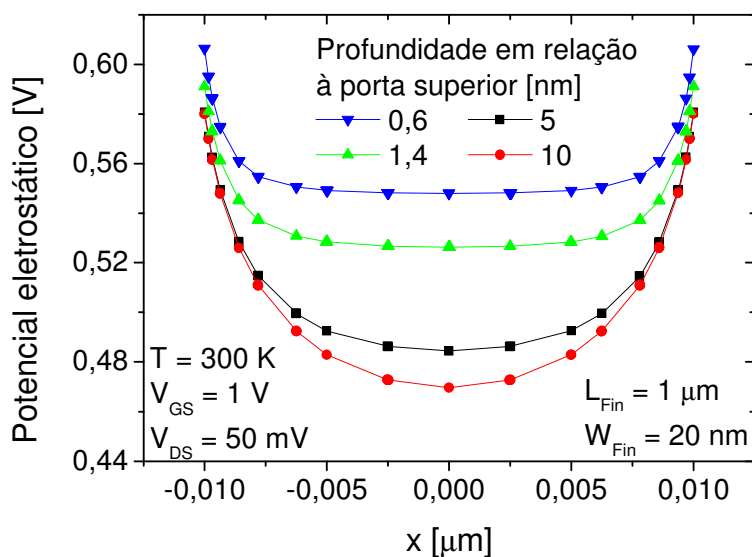


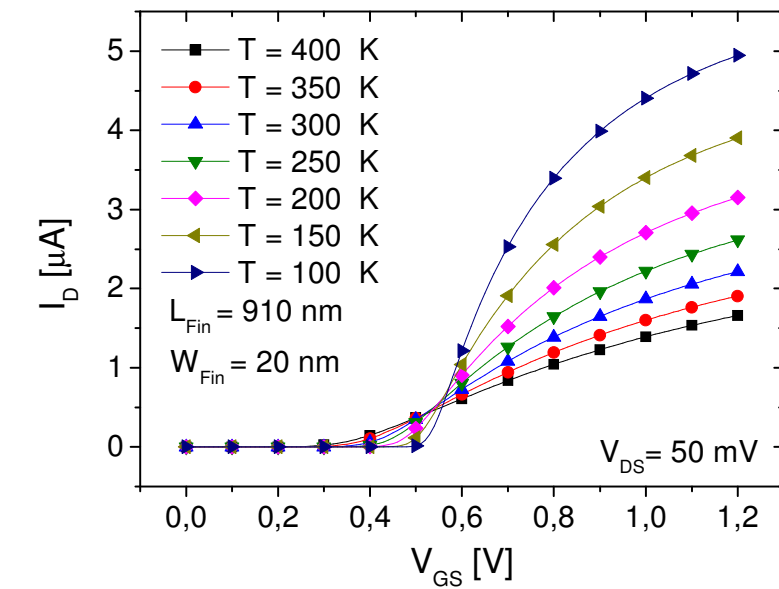
Figura 4.2 – Potencial eletrostático na direção da largura do *fin* em diversas profundidades.

4.2 Corrente de Dreno e Transcondutância

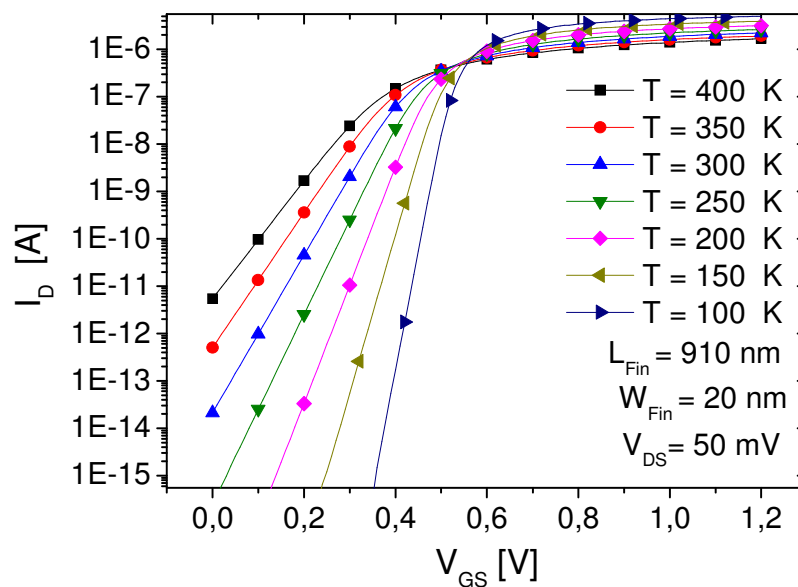
Inicialmente, a corrente de dreno e a transcondutância foram obtidas a fim de se verificar o efeito da redução da temperatura nas características dos dispositivos. A Figura 4.3(A) e a Figura 4.4 mostram, respectivamente, as curvas da corrente de dreno e da transcondutância em função da tensão aplicada à porta para o transistor com $W_{Fin} = 20 \text{ nm}$ e $V_{DS} = 50 \text{ mV}$, realizadas pelo simulador Atlas, para um FinFET com $L_{Fin} = 910 \text{ nm}$. A tensão de limiar obtida pelo método da segunda derivada e a transcondutância máxima extraída dessas curvas são apresentadas na Tabela 4.1. A Figura 4.3(B) mostra a corrente de dreno em escala logarítmica em função da tensão de porta V_G , através da qual é possível extrair a inclinação de sublimiar que também é apresentada na Tabela 4.1. Esses dados mostram que, conforme a temperatura é reduzida, há um aumento na tensão de limiar e na transcondutância máxima enquanto que há uma redução na inclinação de sublimiar. Como g_m é diretamente proporcional à mobilidade, seu incremento reflete o aumento da mobilidade. A inclinação de sublimiar e a tensão de limiar serão analisadas nos itens 4.3 e 4.4, respectivamente.

Na Figura 4.4 também é possível notar que a degradação da transcondutância aumenta com a redução da temperatura, refletindo a degradação da mobilidade. Conforme foi mencionado

no item 2.4.2.2, o aumento desta degradação a partir de $g_{m,max}$ se deve ao aumento do campo elétrico efetivo que está relacionado ao incremento do potencial de Fermi com a redução da temperatura.



(A)



(B)

Figura 4.3 – Corrente de dreno (A) e corrente de dreno em escala logarítmica (B) em função da tensão de porta em um dispositivo com W_{Fin} de 20 nm para diversas temperaturas na faixa entre 100 K e 400 K.

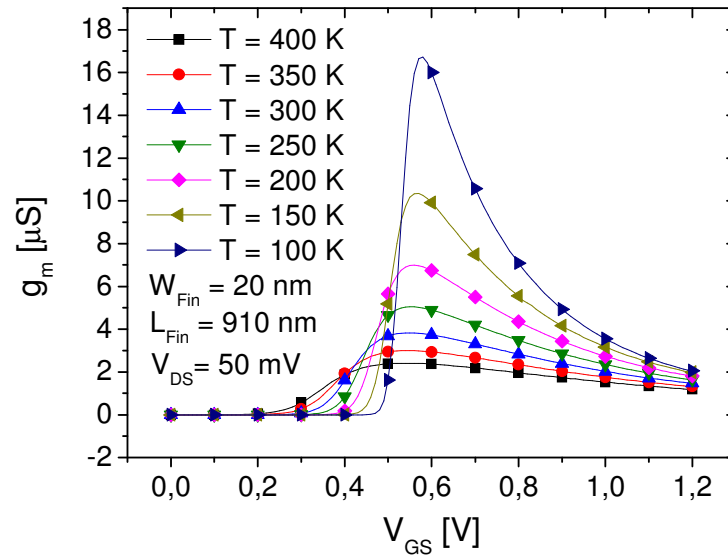


Figura 4.4 – Transcondutância *versus* tensão de porta em um dispositivo com W_{Fin} de 20 nm para diversas temperaturas na faixa entre 100 K e 400 K.

Tabela 4.1 – Tensão de limiar, inclinação de sublimiar e transcondutância máxima extraídas para um dispositivo com $W_{Fin} = 20$ nm, $L_{Fin} = 910$ nm e $V_{DS} = 50$ mV em diversas temperaturas.

| Temperatura [K] | V_{TH} [V] | S [mV/década] | $g_{m,max}$ [μS] |
|-----------------|--------------|---------------|-------------------------|
| 100 | 0,53 | 19,9 | 16,71 |
| 150 | 0,51 | 29,9 | 10,35 |
| 200 | 0,49 | 40,0 | 6,99 |
| 250 | 0,46 | 50,0 | 5,05 |
| 300 | 0,44 | 60,0 | 3,83 |
| 350 | 0,41 | 70,1 | 3,00 |
| 400 | 0,38 | 80,2 | 2,41 |

4.3 Inclinação de Sublimiar

A inclinação de sublimiar foi obtida para dispositivos entre 20 nm e 100 nm de W_{Fin} , em uma faixa de temperatura que varia de 100 K a 400 K. A inclinação foi obtida fazendo-se a

derivada do logaritmo da curva $I_D \times V_{GS}$ e, posteriormente, invertendo-se o resultado. Para baixos valores de V_G , a curva resultante é aproximadamente constante. Então, é obtido um ponto médio nessa região, que representa a inclinação de sublimiar. Para esta extração foram utilizadas simulações Atlas considerando a tensão entre dreno e fonte de 50 mV e transistores com $L_{Fin} = 910$ nm.

A Figura 4.5 mostra as inclinações obtidas. Pode-se observar que todos os dispositivos apresentam uma inclinação muito próxima do limite teórico. No entanto, conforme W_{Fin} diminui, esta inclinação tende a ser menor. Pode-se observar também que ao reduzir a temperatura, a inclinação de todos os dispositivos tende ao valor teórico obtido pela equação (2.43) com n igual a 1.

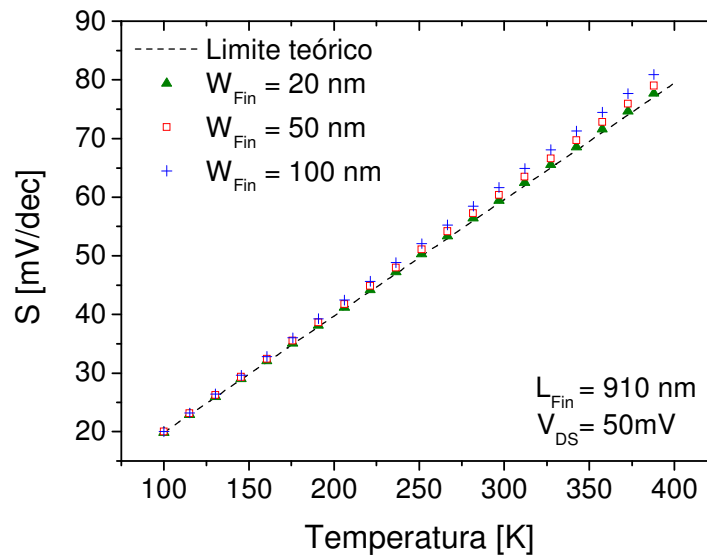


Figura 4.5 – Inclinação de sublimiar em função da temperatura para várias larguras de *fin* juntamente com o valor mínimo teórico.

4.4 Tensão de Limiar

A tensão de limiar foi extraída utilizando o método da segunda derivada da corrente de dreno e o método descrito no item 2.3.1, onde V_{TH} corresponde ao ponto de V_G no qual a razão g_m/I_D diminui à metade do seu valor máximo. Para todas as extrações foi utilizada uma tensão

entre dreno e fonte de $V_{DS} = 50$ mV e um transistor com $L_{Fin} = 910$ nm. Para realizar as comparações foi utilizado o modelo analítico descrito pela equação (2.26).

4.4.1 Método de Extração pela Razão g_m/I_D

Conforme descrito no item 2.3.1, a tensão de limiar obtida no ponto onde a razão g_m/I_D é metade de seu valor máximo representa o ponto onde as componentes de deriva e difusão da corrente apresentam a mesma magnitude. Dessa forma, foi realizada, primeiramente, uma comparação entre a tensão de limiar obtida pela curva de g_m/I_D com o ponto onde as componentes de deriva e difusão da corrente se igualam.

A fim de se obter as componentes de deriva e difusão, foi necessário fazer um corte transversal ao sentido da corrente no dispositivo, extrair as componentes de deriva e difusão em cada ponto de grade e, então, realizar a integral das correntes pontuais. Apenas neste caso, devido à limitação do simulador, foram realizadas simulações numéricas bidimensionais no Atlas, enquanto que ao longo do trabalho todas as simulações realizadas foram tridimensionais. Foram simulados dispositivos com duas espessuras da camada de silício: 10 nm e 40 nm.

A Figura 4.6 apresenta a curva da corrente de dreno pela tensão de porta (eixo y esquerdo) e a curva da razão g_m/I_D pela tensão V_G (eixo y direito). Nestas simulações foi considerado o modelo de mobilidade constante. Pode-se observar que para os dois dispositivos simulados, a metade do valor máximo de g_m/I_D e o ponto de cruzamento das correntes de deriva e difusão da corrente ocorrem exatamente na mesma posição, concordando com a demonstração analítica do método.

Na seqüência, foram considerados então os modelos de degradação da mobilidade conforme descrito no item 3.1.1. A Figura 4.7 apresenta os resultados das curvas I_D versus V_G e g_m/I_D versus V_G . Neste caso, devido à degradação da mobilidade dos portadores, há uma pequena variação na curva de g_m/I_D , que leva a uma diferença de 16 mV para $W_{Fin} = 10$ nm e 12 mV para $W_{Fin} = 40$ nm, portanto uma pequena diferença face ao valor da tensão de limiar. Essa diferença se deve ao fato da dedução do método de g_m/I_D ter sido realizada considerando as mobilidades de difusão e deriva iguais.

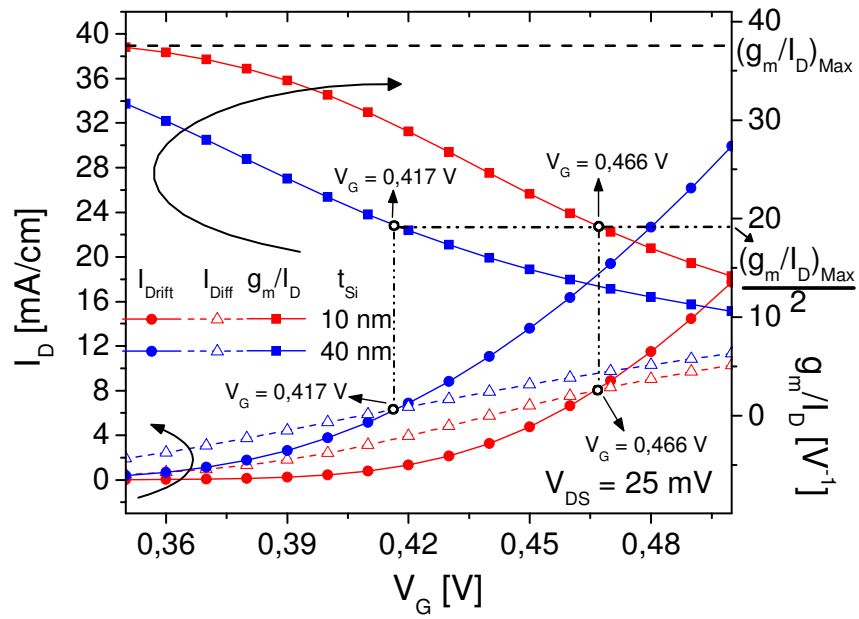


Figura 4.6 – Corrente de dreno em função de tensão de porta (y esquerdo) e razão g_m/I_D em função de V_G (y direito) considerando a mobilidade constante.

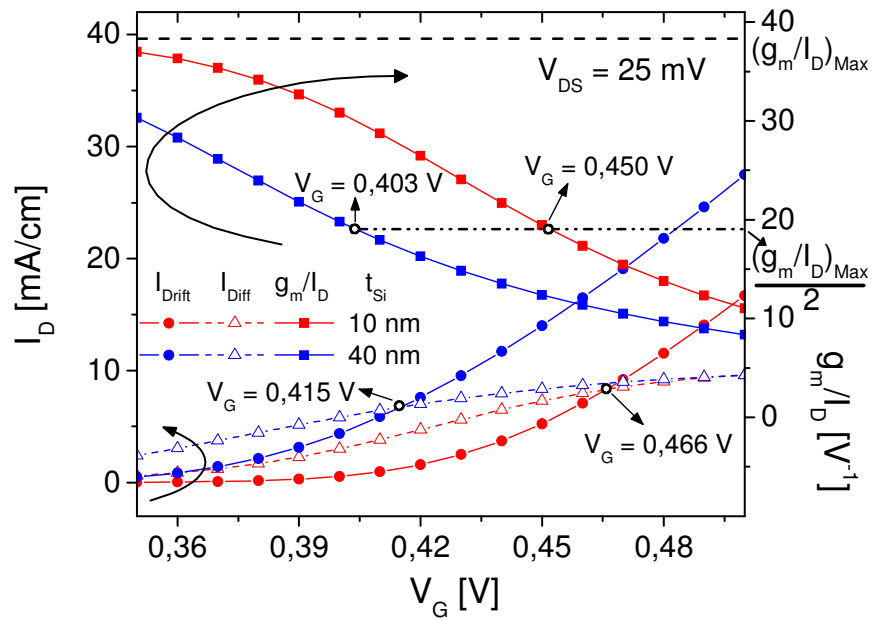


Figura 4.7 - Corrente de dreno em função de tensão de porta (y esquerdo) e razão g_m/I_D em função de V_G (y direito) considerando os modelos descritos no item 3.1.1.

4.4.2 Simulações Atlas

Primeiramente, foi analisada a variação de V_{TH} para um *fin* estreito de $W_{Fin} = 20$ nm, comparando-se com o modelo da equação (2.26). A Figura 4.8 mostra V_{TH} obtido em função da temperatura por simulação Atlas. Como a variação de V_{TH} é aproximadamente linear, foi extraído o coeficiente angular da reta média dos pontos. A tabela dentro da figura mostra a inclinação obtida pelo uso dos dois métodos e também do modelo analítico. Pode-se perceber que a inclinação obtida pelo método da razão de g_m/I_D é a mesma do modelo. Já o método da segunda derivada mostrou uma maior dependência com a temperatura. É possível notar também que ambos os métodos utilizados apresentam valores muito próximos de V_{TH} em baixa temperatura, porém, à medida que a temperatura aumenta os métodos divergem [91].

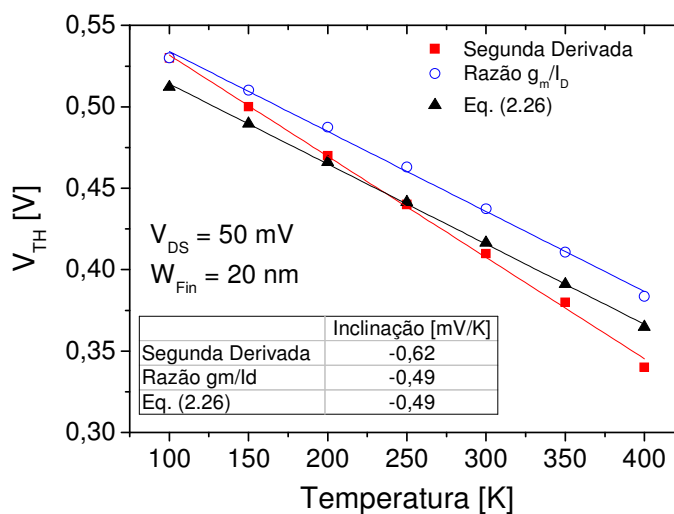


Figura 4.8 – Tensão de limiar *versus* “T” com $W_{Fin} = 20$ nm gerados por simulação Atlas.

Como houve essa divergência entre as inclinações dV_{TH}/dT entre os métodos de extração, os potenciais de superfície foram obtidos na condição de limiar para os dois métodos e para o modelo analítico, sendo então comparados com o modelo de potenciais de superfície proposto por Cerdeira *et al* [92]:

$$\Phi_{S_{BT}} = V_G - V_{FB} - \frac{Q_{depl}}{2C_{ox}} - \Phi_t LW \left[\frac{Q_{depl}}{4C_{ox} \Phi_t} e^{\frac{V_G - V_{FB} - 2\Phi_t - \frac{Q_{depl}}{2C_{ox}}}{\Phi_t}} \right] \quad (4.1)$$

$$\Phi_{S_{AT}} = V_G - V_{FB} - 2\Phi_t LW \left[\frac{\sqrt{2Q_{depl} C_{Si} \Phi_t}}{2C_{ox} \Phi_t} \sqrt{1 - e^{-\alpha_p}} e^{\frac{V_G - V_{FB} - 2\Phi_t - V_C}{2\Phi_t}} \right] \quad (4.2)$$

$$\Phi_S = \frac{\Phi_{S_{BT}}}{2} [1 - \tanh[10(V_G - V_{TH} - V_C)]] + \frac{\Phi_{S_{AT}}}{2} [1 + \tanh[10(V_G - V_{TH} - V_C)]] \quad (4.3)$$

onde $LW[]$ é a função de Lambert, α_p é a diferença entre os potenciais de superfície e centro normalizada pelo potencial térmico, $\phi_{S_{AT}}$ é o potencial de superfície acima do limiar, $\phi_{S_{BT}}$ é o potencial de superfície abaixo do limiar e ϕ_S é o potencial de superfície.

O modelo de superfície utilizado tem a vantagem de ser contínuo, considerando tanto a região sublimiar como a região acima do limiar [92]. Para efetuar tal comparação, foi obtido o potencial na fonte em $V_G = V_{TH}$ ($\phi_{S_{TH}}$), considerando V_{TH} dado por cada um dos métodos de extração bem como pelo modelo da equação (2.26), e em $V_G = 0$ (ϕ_{S_0}). Então, foi realizada a diferença ($\phi_{S_{TH}} - \phi_{S_0}$) entre os potenciais. Esta diferença é apresentada na Figura 4.9.

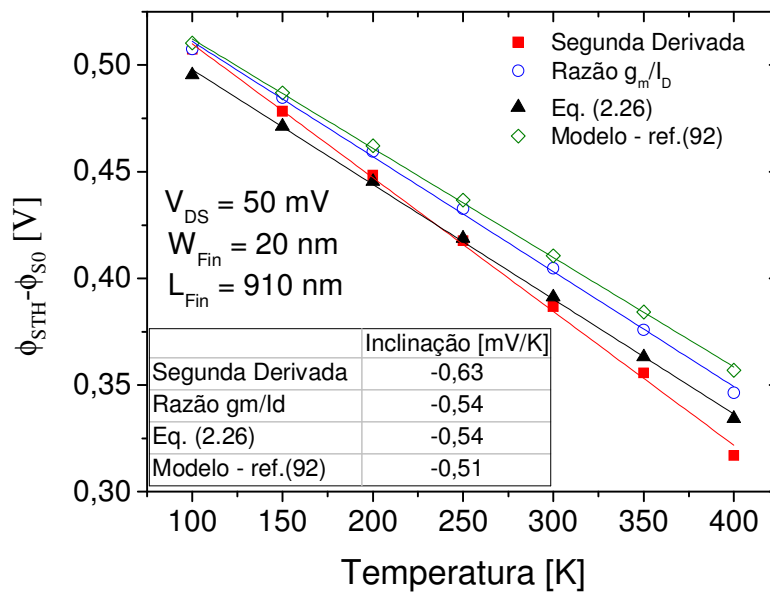


Figura 4.9 – Diferença entre os potenciais extraídos na fonte na condição de limiar e com polarização nula na porta em função da temperatura.

Pode-se notar que a inclinação da reta aproximada entre o método de g_m/I_D e do modelo analítico (eq. (2.26)) foram muito próximos da variação obtida com o modelo da ref. [92]. O método da segunda derivada apresenta uma variação do potencial com a temperatura maior que o método da razão g_m/I_D e que ambos os modelos analíticos. Assim, tem-se que o potencial na condição de limiar pelo método de g_m/I_D se aproxima mais do potencial esperado de acordo com [92] que o método da segunda derivada ao considerar toda a faixa de temperatura [91]. Deste modo, o método da segunda derivada tende a indicar uma maior variação de V_{TH} com a temperatura, a qual não tem sustentação nos modelos analíticos.

4.4.2.1 Expansão em Série de Taylor

A equação (2.32) mostra a variação da tensão de limiar com a temperatura para um dispositivo porta dupla. Como esta equação é relativamente complexa, não é possível determinar como V_{TH} varia com a temperatura, bem como a influência que a largura do *fin* ou do óxido de porta teriam nesta variação. Assim, como a tensão de limiar varia quase linearmente com “T” conforme a Figura 4.8, a equação (2.26) pode ser desenvolvida em série de Taylor. A série de uma função é dada por:

$$T(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x - a)^n \quad (4.4)$$

onde “a” é o ponto central através do qual a série será desenvolvida, x é a variável utilizada para desenvolver a série e $f^{(n)}(a)$ é a n ésima derivada da função no ponto “a”.

Para desenvolver em série, a equação (2.26), sem o terceiro termo (relacionado aos efeitos quânticos), será utilizada como a função $f()$, sendo a variável x a temperatura. Como o objetivo é aproximar por uma função de primeiro grau, serão calculados apenas os dois primeiros termos da série (para $n = 0$ e $n = 1$). De forma a tornar a série mais abrangente, as variáveis W_{Fin} e t_{ox} serão mantidas. O valor de “a” foi adotado em 245 K por estar próximo do centro do intervalo de temperatura estudado (100 K a 400 K).

Para $n = 0$, considerando $\Delta\phi_{mi} = (4,7 - (4,15 + E_G/2))$ e n_i e E_G de acordo com o item 2.4.1, tem-se que:

$$T_0 = \Delta\phi_{mi} + \frac{k T}{q} \ln\left(\frac{2 \varepsilon_{ox} kT}{q^2 n_i t_{ox} W_{Fin}}\right) \Bigg|_{T=245} = -0,160 - 0,021 \ln(t_{ox} W_{Fin}) \quad (4.5)$$

Para $n = 1$, tem-se que:

$$T_1 = \frac{d}{dT} \left(\Delta\phi_{mi} + \frac{k T}{q} \ln\left(\frac{2 \varepsilon_{ox} kT}{q^2 n_i t_{ox} W_{Fin}}\right) \right) \Bigg|_{T=245} \quad (4.6)$$

A derivada da tensão de limiar é dada pela equação (2.32). Dessa forma a equação (4.6) pode ser reescrita como:

$$T_1 = \left[-\frac{1}{2} \frac{dE_G}{dT} + \frac{k}{q} \left(1 + \ln\left(\frac{2 \varepsilon_{ox} kT}{q^2 n_i t_{ox} W_{Fin}}\right) - \frac{T}{n_i} \frac{dn_i}{dt} \right) \right] \Bigg|_{T=245} \quad (4.7)$$

Com as mesmas considerações utilizadas para calcular $T_0(x)$ e simplificando o resultado, a equação (4.7) resulta em:

$$T_1 = -2,958 \cdot 10^{-3} - \frac{k}{q} \ln(t_{ox} W_{Fin}) \quad (4.8)$$

A tensão de limiar expandida em série resulta em:

$$V_{TH} = T_0 + T_1 \cdot (T - 245) \quad [V] \quad (4.9)$$

Substituindo T_0 e T_1 pelas equações (4.5) e (4.8) respectivamente, pode-se obter que:

$$V_{TH} = -0,160 - 0,021 \ln(t_{ox} W_{Fin}) + \left[-2,958 \cdot 10^{-3} - \frac{k}{q} \ln(t_{ox} W_{Fin}) \right] \cdot (T-245) \quad [V] \quad (4.10)$$

onde as espessuras W_{Fin} e t_{ox} são dadas em [cm] e T em [K].

A Figura 4.10 mostra a comparação entre a tensão de limiar obtida pela equação (2.26) e pela sua expansão em série descrita pela equação (4.10). A série desenvolvida se aproxima muito dos valores obtidos pela função, com erro inferior a 0,4 %.

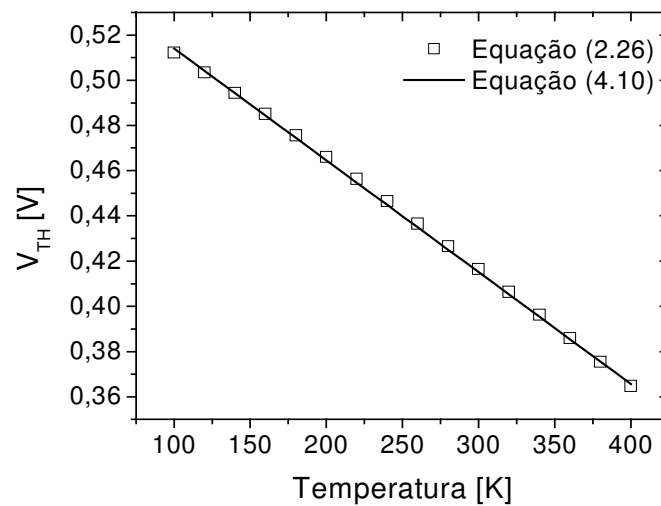


Figura 4.10 – Comparação entre a equação (2.26) e a sua expansão em série (equação (4.10)).

O termo entre colchetes na equação (4.10) representa a inclinação da reta de variação com a temperatura. Este termo possui uma constante e um termo logarítmico com as espessuras do óxido e da largura do *fin*. Com a redução de W_{Fin} ou de t_{ox} , o módulo do termo entre colchetes será menor, levando a uma menor influência da temperatura sobre V_{TH} em *fins* mais estreitos. A multiplicação de ambas as espessuras mostra que pode haver compensação entre elas, ou seja, caso seja necessária certa variação com a temperatura e não se consegue atingí-la apenas diminuindo W_{Fin} , por exemplo, pode-se diminuir t_{ox} pois os efeitos se somam [91].

4.4.2.2 Variação da Largura do *fin*

Pela equação (4.10) pode-se notar claramente que a largura do *fin* (W_{Fin}) apresenta influência em V_{TH} . A variação obtida para várias larguras de *fin*, utilizando cada um dos métodos de extração (utilizando a simulação Atlas), pelo modelo analítico e pela expansão em série de Taylor se encontra na Tabela 4.2. Pode-se notar que pelo método da segunda derivada a variação é sempre maior (em módulo) que dos outros método/modelos e que para larguras maiores que 30 nm este método apresentou uma variação constante com “T” [91].

As equações (2.26) e (4.10) obtiveram inclinações parecidas, mostrando a concordância entre expansão em série e a função original. O método da razão de g_m/I_D apresenta variações muito próximas às do modelo analítico. Pode-se notar que a diferença entre as variações do método de g_m/I_D e da equação (2.26) ou da equação (4.10) cresce conforme W_{Fin} é elevado. Isso acontece pois o modelo analítico utilizado foi desenvolvido para dispositivos porta dupla e, portanto, quanto menor for W_{Fin} , a aproximação do dispositivo simulado (porta tripla) por um transistor porta dupla se torna mais precisa. No entanto, mesmo para o dispositivo com W_{Fin} de 50 nm essa diferença entre os coeficientes angulares é pequena. Os transistores simulados apresentam canal longo com $L_{Fin} = 910$ nm.

Tabela 4.2 – Variação de V_{TH} com “T” para diferentes larguras de *fin*.

| Método/Modelo | Variação [mV/K] | | | |
|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | $W_{Fin} = 20\text{nm}$ | $W_{Fin} = 30\text{nm}$ | $W_{Fin} = 40\text{nm}$ | $W_{Fin} = 50\text{nm}$ |
| Segunda Derivada | -0,621 | -0,664 | -0,664 | -0,664 |
| Razão g_m/I_D | -0,492 | -0,525 | -0,546 | -0,561 |
| Equação (2.26) | -0,492 | -0,527 | -0,552 | -0,571 |
| Equação (4.10) | -0,495 | -0,530 | -0,554 | -0,574 |

No item 2.4.2.1, foi descrito que a variação de V_{TH} para um transistor SOI totalmente depletado, desprezando-se as armadilhas de interface, é igual a própria variação de ϕ_F com T. Assim, a variação $d\phi_F/dT$ obtida por aproximação linear dos valores calculados pela equação (2.2) é dado por -1,16 mV/K. Este valor foi obtido considerando as dependências de n_i e N_A com

a temperatura em uma faixa de 100 K a 400 K com passo de 50 K. Pela Tabela 4.2 pode-se perceber que um transistor porta dupla apresenta praticamente a metade da inclinação do dispositivo SOI planar, sendo o primeiro, portanto, menos sensível à variação de V_{TH} com T .

A Figura 4.11 mostra a variação da tensão de limiar com a largura do *fin* em temperatura ambiente. Pelo método da segunda derivada, V_{TH} não possui uma variação significativa com W_{Fin} . Pelas curvas provenientes da equação (2.26) e da extração utilizando o método de g_m/I_D , é possível notar que ambas seguem a mesma tendência embora a variação de V_{TH} pela equação seja maior. A Figura 4.12 mostra a variação de V_{TH} com W_{Fin} , mostrando que os valores obtidos para um dispositivo porta tripla (V_{TH} obtida pela simulação e extraída pelo método de g_m/I_D) é menor que os obtidos para um porta dupla (equação (2.26)), concordando com a referência [93].

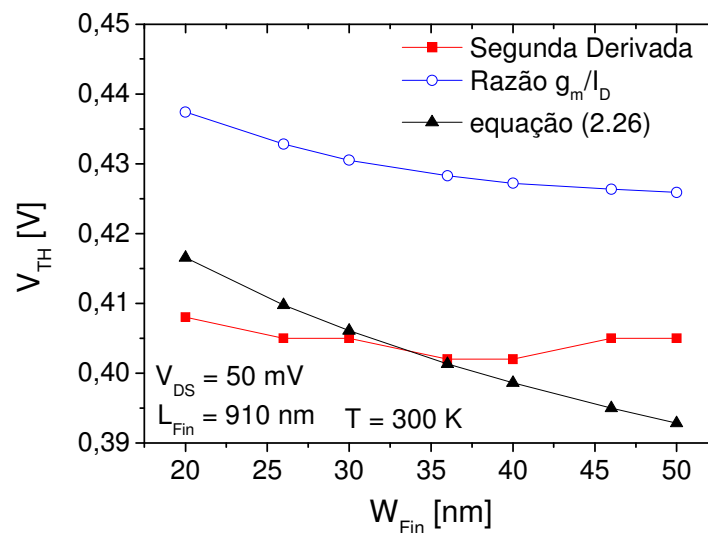


Figura 4.11 – Tensão de limiar *versus* largura do *fin* em temperatura ambiente obtidas por simulação Atlas.

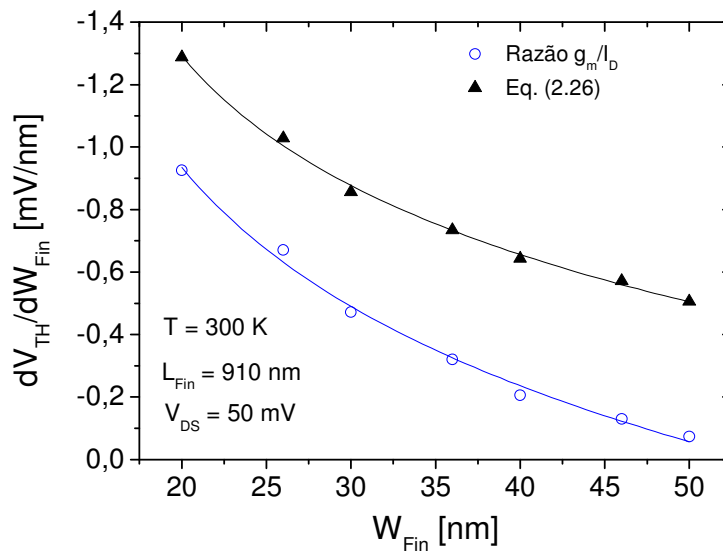


Figura 4.12 – Variação da tensão de limiar com W_{Fin} .

Com a redução da temperatura, a variação da tensão de limiar com W_{Fin} diminui. A Figura 4.13 mostra V_{TH} em função de W_{Fin} com “T” = 100 K. Pode-se observar que a tensão de limiar extraída pelos dois métodos se mantém constante com a largura do *fin*. Pode-se notar ainda que a variação prevista pelo modelo analítico também diminui. Em 300 K (Figura 4.11), a redução em V_{TH} esperada, de acordo com o modelo, ao se reduzir W_{Fin} de 50 nm para 20 nm era de 24 mV enquanto que em 100 K é esperada uma variação de 8 mV.

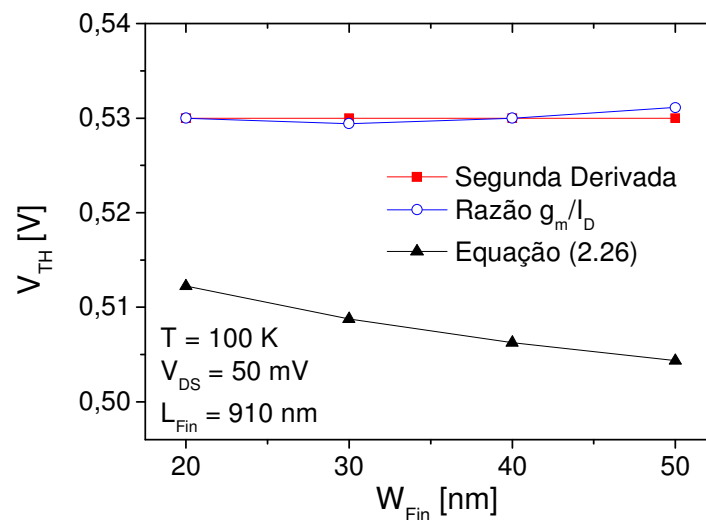


Figura 4.13 – Tensão de limiar *versus* largura do *fin* em “T” = 100 K.

4.4.3 Resultados Experimentais

Os dispositivos medidos são similares aos simulados sendo fabricados no *Interuniversity Microelectronics Center* – IMEC, Leuven, Bélgica, de acordo com a referência [94], em uma lâmina SOI com 145 nm de óxido enterrado. A altura do *fin* é de 60 nm e o óxido de porta é composto por 1 nm de óxido térmico, seguido de 2 nm de HfO₂ depositado e, por fim, uma deposição de 5 nm de filme de TiN. O dispositivo é composto de 30 *fins* em paralelo, sendo que cada um possui largura de 20 nm e comprimento de 90 nm.

A fim de se garantir que tais dispositivos não estejam sofrendo influência de efeitos de canal curto, o DIBL foi extraído. Para tal, foram feitas as medidas da corrente de dreno pela tensão aplicada à porta para dois valores de V_{DS}: 0,1 V e 1,1 V. As tensões de limiar foram extraídas utilizando-se o método da corrente constante, através do qual V_{TH} é obtido no ponto em que:

$$I_{DS} = 10^{-7} \left(\frac{W_t}{L} \right) \quad [A] \quad (4.11)$$

onde W_t é a largura total do transistor sendo dado por 2H_{Fin} + W_{Fin} e L_{Fin} é o comprimento do canal.

Esse método foi adotado pois como é necessário obter V_{TH} para tensões de dreno altas, tanto o método da razão g_m/I_D como o método da segunda derivada se tornam impróprios.

O DIBL, então, será descrito por [38,95]:

$$DIBL = \frac{V_{TH2} - V_{TH1}}{V_{DS2} - V_{DS1}} \quad (4.12)$$

onde os índices 1 e 2 representam a tensão de limiar obtida para um V_{DS} de 0,1 V e 1,1 V, respectivamente.

A Tabela 4.3 mostra o DIBL extraído para os dispositivos medidos. Pode-se notar que à medida que a temperatura diminui, o DIBL é reduzido. Como as variações obtidas pelo DIBL são pequenas, tais dispositivos não apresentam efeitos de canal curto.

Tabela 4.3 – DIBL extraído para os dispositivos medidos

| Temperatura [K] | DIBL [mV/V] |
|-----------------|-------------|
| 380 | 20 |
| 300 | 20 |
| 184 | 15 |
| 105 | 5 |

A corrente de porta também foi medida, a fim de se garantir que tal corrente não estivesse interferindo no funcionamento do dispositivo. Os valores obtidos para todas as temperaturas não ultrapassaram 300 pA, bastante inferiores a I_D em ambas as tensões V_{DS} utilizadas conforme apresentado na Figura 4.14

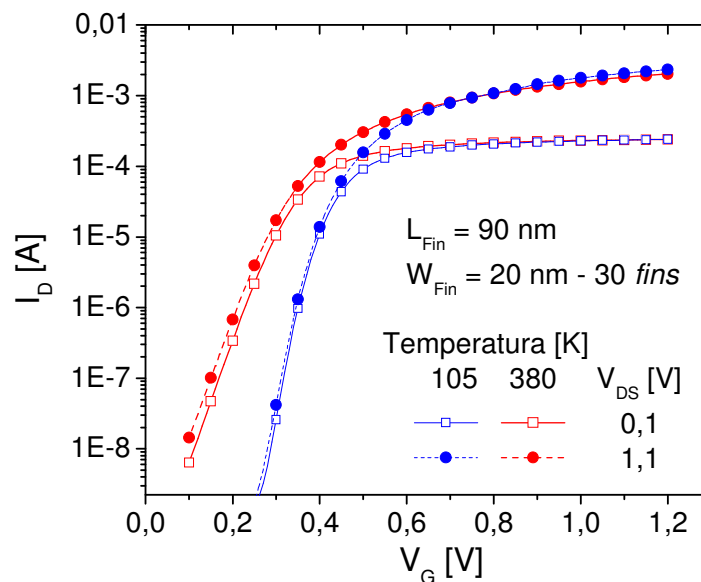


Figura 4.14 – Corrente de dreno em função da tensão de porta nos dispositivos medidos com $W_{Fin} = 20 \text{ nm}$ e $L_{Fin} = 90 \text{ nm}$ para $V_{DS} = 0,1 \text{ V}$ e $1,1 \text{ V}$.

A Figura 4.15 apresenta a variação da tensão de limiar obtida pelos dois métodos (segunda derivada e g_m/I_D) para os dispositivos medidos com V_{DS} de 50 mV em uma faixa de

temperatura próxima à utilizada nas simulações (entre 105 K e 380 K). Pode-se notar que, assim como nas simulações, o método da segunda derivada apresenta uma variação dV_{TH}/dT maior que o método da razão de g_m/I_D . Embora as inclinações das retas adaptadas sejam menores que as simuladas ou as obtidas pelo modelo analítico, as curvas seguem a mesma tendência que foi observada.

A redução nas inclinações face ao observado teoricamente, pode ter ocorrido devido a variações entre os tamanhos dos dispositivos simulados e medidos. Nas simulações foi considerado um óxido de porta equivalente de 2 nm. O óxido de porta do transistor medido é formado por SiO_2 e HfO_2 , apresentando um óxido equivalente menor que o simulado. Assim, pela equação (4.10), tem-se que ao se diminuir t_{ox} o termo logarítmico aumenta. Como este termo será positivo enquanto que o outro termo entre colchetes é negativo, a diferença entre eles diminui, reduzindo a inclinação. Da mesma forma, se os dispositivos medidos apresentarem largura menor que a teórica considerada, a variação de V_{TH} com a temperatura diminui. No caso de ambas as dimensões serem menores que as consideradas, os efeitos se somam [91].

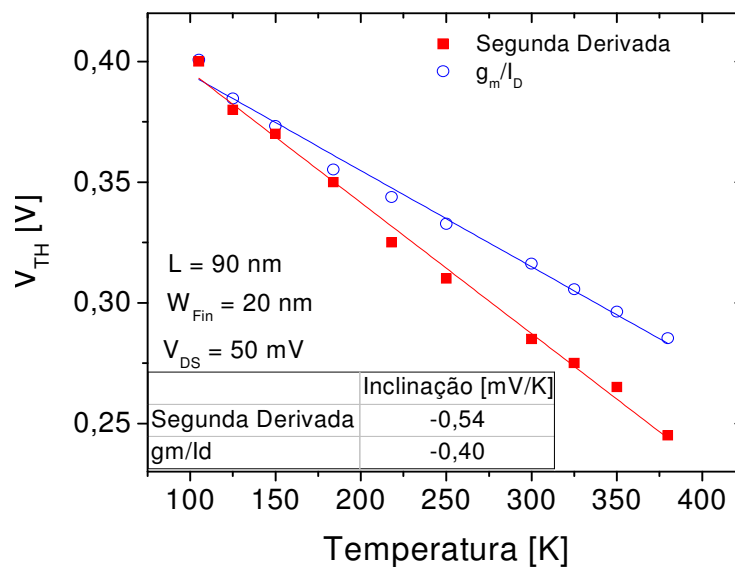


Figura 4.15 – V_{TH} versus “T” em dispositivos medidos com W_{Fin} de 20 nm e L_{Fin} de 90 nm.

4.4.4 Simulações *Sentaurus Device*

A tensão de limiar dos dispositivos também foi analisada por simulação *Sentaurus Device*. Inicialmente, foi analisada a variação da tensão de limiar com a temperatura no intervalo de 100 K a 300 K para um dispositivo com W_{Fin} de 20 nm e L_{Fin} de 1 μm .

A Figura 4.16 mostra a variação de V_{TH} obtida. Pode-se observar que os valores obtidos de inclinação pelo método de g_m/I_D e da segunda derivada se aproximam dos valores obtidos nas simulações Atlas e através da equação (2.26) exibidos na Figura 4.8.

Foi também analisada a variação da tensão de limiar com o comprimento de canal. A Figura 4.17 apresenta os resultados obtidos em um dispositivo com W_{Fin} de 20 nm em temperatura ambiente. Pode-se observar que ambos os métodos da segunda derivada e de g_m/I_D apresentam variações semelhantes com L_{Fin} . Para um dispositivo estreito, há um acoplamento maior entre as portas fazendo com que os efeitos de canal curto sejam reduzidos. Pode-se notar que, mesmo para os dispositivos de 50 nm de comprimento, a diminuição da tensão é de 30mV em relação aos dispositivos mais largos utilizando-se o método da segunda derivada representando uma variação máxima de 7% e uma diminuição de 18 mV é obtida quando o método de g_m/I_D é utilizado representando uma diminuição máxima de 4%.

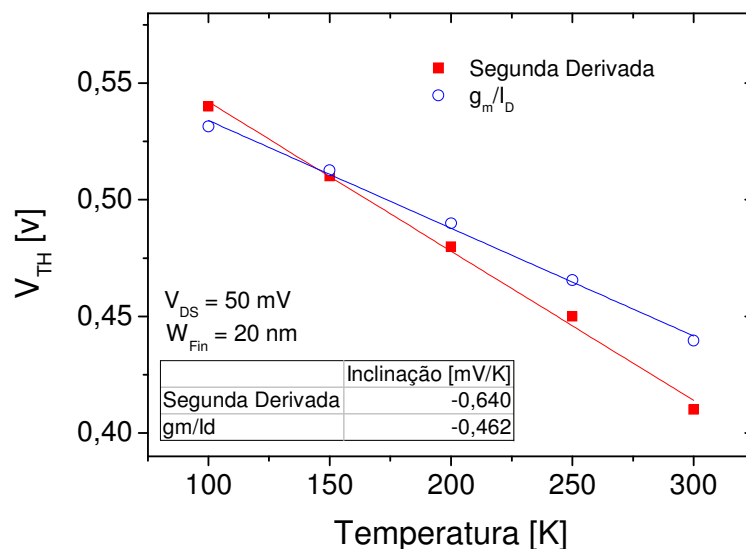


Figura 4.16 – Variação de V_{TH} por “T” para um dispositivo com W_{Fin} de 20 nm em simulação *Sentaurus Device*.

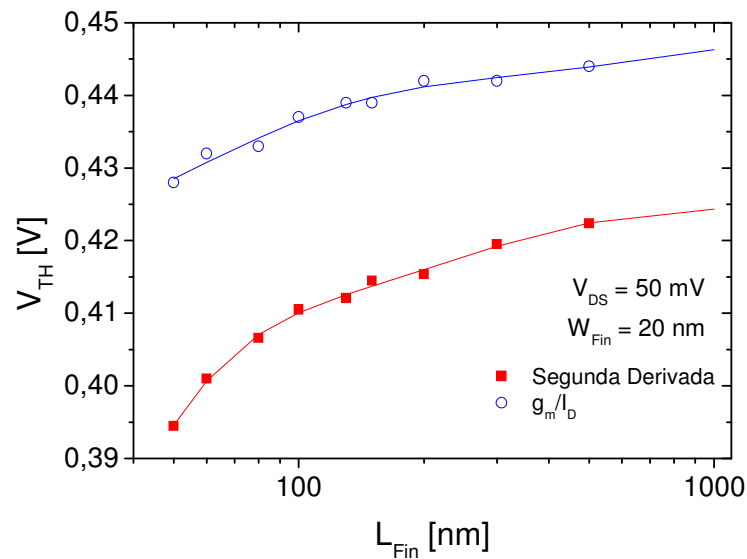


Figura 4.17 – Efeito da redução do comprimento de canal em V_{TH} .

A tensão de limiar foi avaliada para *fins* menores que 20 nm de largura. Assim, fez-se necessário a adição de efeitos quânticos nas simulações e no modelo analítico. Neste caso, o comprimento do canal do dispositivo simulado é de 90 nm. A Figura 4.18 mostra a concentração de elétrons obtida com e sem a utilização dos efeitos quânticos para transistor com W_{Fin} de 5 nm, 10 nm, 15 nm, 20 nm e 30 nm. O corte foi feito na direção da largura do *fin*, na metade do comprimento e da altura do mesmo com V_{DS} 50 mV e $V_{GS} = 1,2$ V. Pode-se notar que existe, mesmo para os dispositivos mais largos, uma variação na concentração de elétrons. Enquanto o modelo clássico prevê que a concentração é maior na interface lateral com o óxido de porta e diminui à medida que se aproxima do centro do dispositivo, o modelo quântico prevê que a maior concentração de elétrons ocorre um pouco distante da superfície. No caso do dispositivo de $W_{Fin} = 30$ nm, ocorre a 1 nm da interface. Também há uma diminuição do valor de pico da concentração. Embora haja este deslocamento do ponto de máximo na concentração de elétrons, não há mudança significativa nas características, apenas um leve decréscimo da corrente. Para o dispositivo de 5 nm, pode-se observar a inversão de volume, onde os elétrons passam a se concentrar no centro do canal ao invés das interfaces deste com o óxido. A integral das curvas apresentadas na Figura 4.18 representa a densidade de elétrons por unidade de área. Para o dispositivo com $W_{Fin} = 30$ nm, a densidade utilizando o modelo clássico é de $1,31 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$,

enquanto que utilizando o modelo quântico a densidade é de $1,13 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Essa diferença se deve à degradação da capacitância de porta [96].

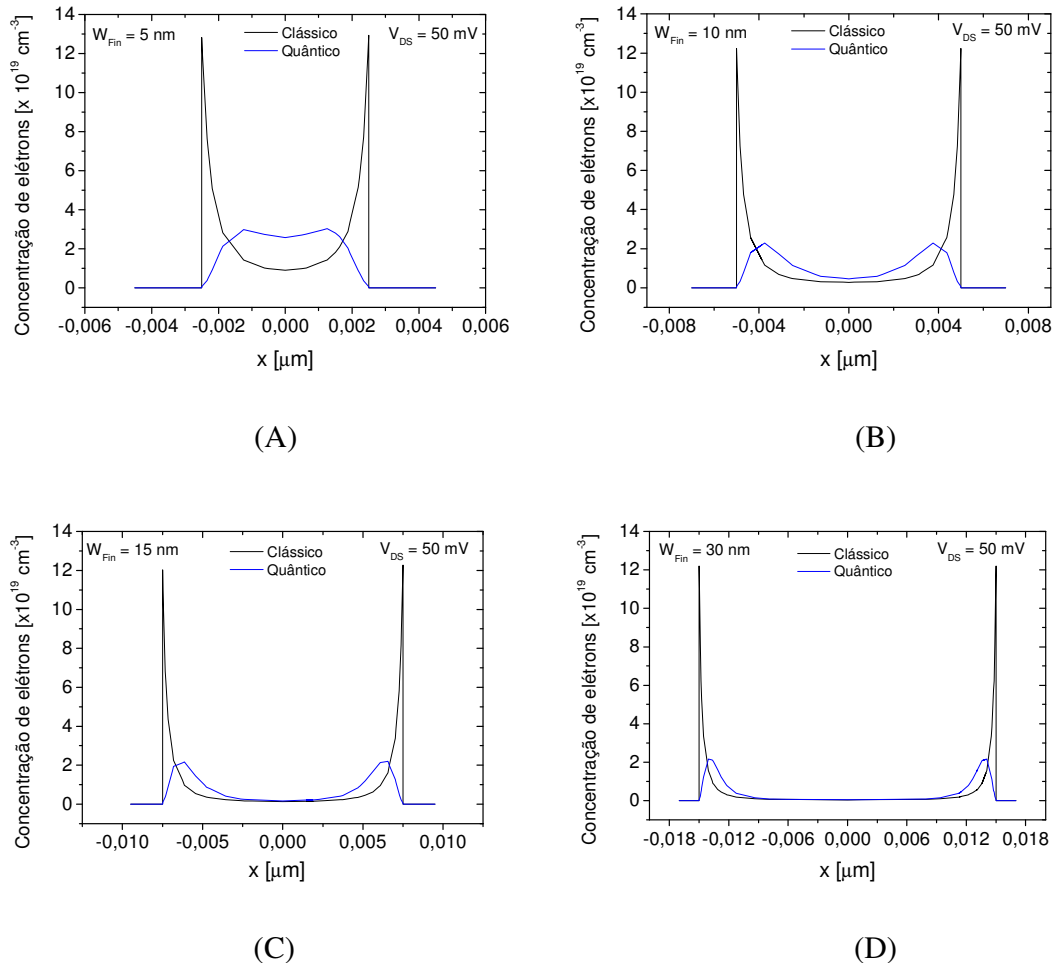


Figura 4.18 – Concentração de elétrons na direção da largura do *fin* utilizando o modelo clássico e o quântico para dispositivos com W_{Fin} de 5 nm (A), 10 nm (B), 15 nm (C) e 30 nm (D).

A Figura 4.19 mostra a variação de V_{TH} com a largura do *fin*. A tensão de limiar obtida pela equação (2.26) foi calculada utilizando e desprezando o terceiro termo a fim de se considerar a física quântica e a clássica, respectivamente. Pode-se observar que os efeitos quânticos se tornam significativos para dispositivos menores que 10 nm. Com um W_{Fin} de 5 nm há um aumento de 20 mV na tensão de limiar em relação ao modelo clássico. Para os dispositivos mais largos a variação na tensão de limiar é desprezível. Nesta figura foi utilizado apenas o método de g_m/I_D para realizar a extração de V_{TH} dos dispositivos simulados. Na Figura 4.20 são comparados os dois métodos de extração de tensão de limiar na presença de efeitos

quânticos. Pode-se observar que ambos os métodos apresentam as mesmas tendências de variação.

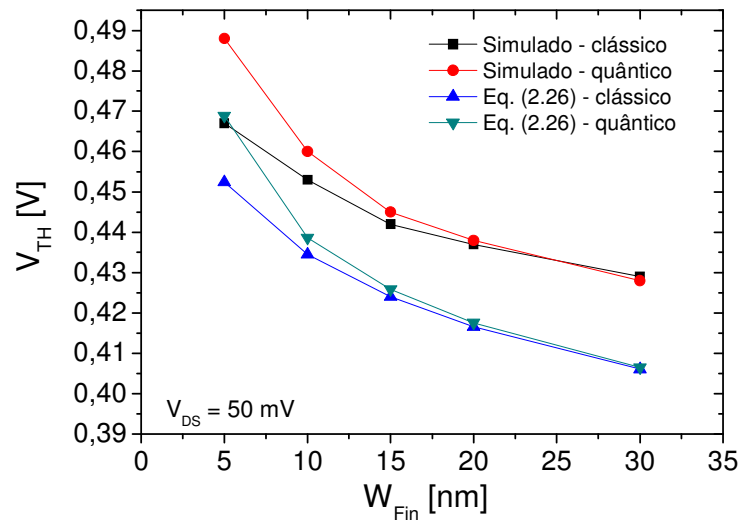


Figura 4.19 – Tensão de limiar obtida em função de W_{Fin} considerando efeitos quânticos.

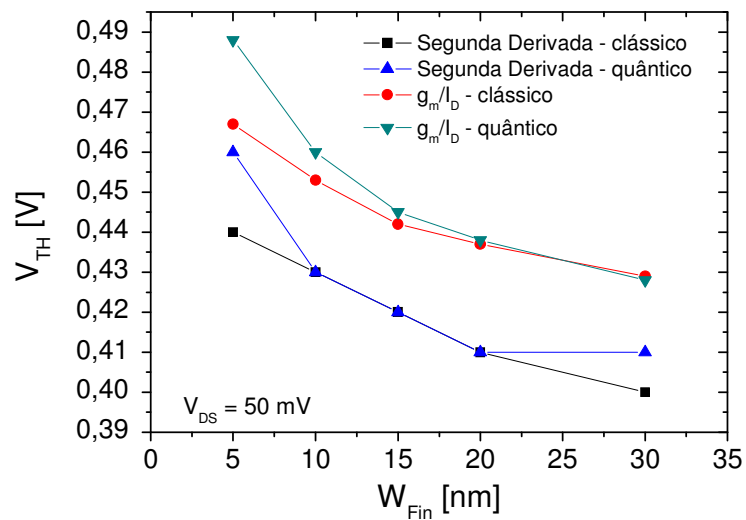


Figura 4.20 – Tensão de limiar em função de W_{Fin} comparando-se os métodos de extração de V_{TH} na presença de efeitos quânticos.

Considerando os efeitos quânticos, foram realizadas as simulações em função da temperatura para um dispositivo de 5 nm de largura do *fin* e 90 nm de comprimento. A Figura 4.21 mostra a variação da tensão de limiar obtida pelos dois métodos de extração.

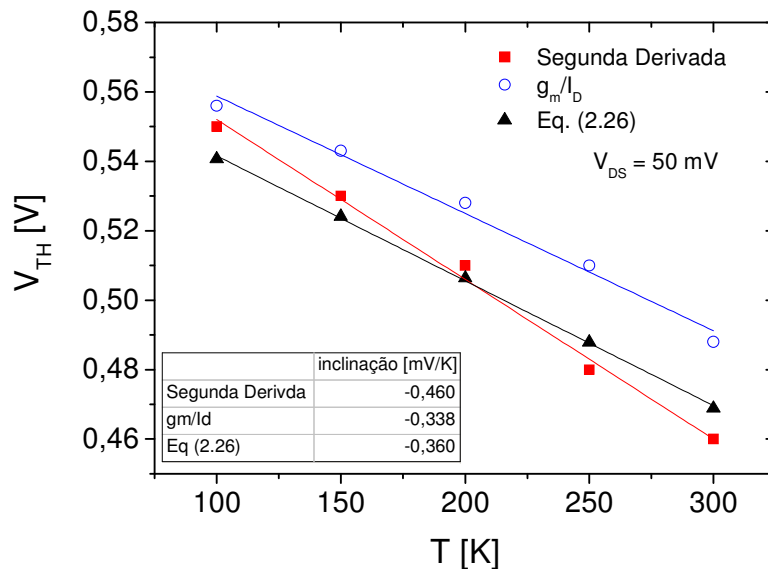


Figura 4.21 – Variação da tensão de limiar com a temperatura para um dispositivo com W_{Fin} de 5 nm.

Utilizando a equação (4.10) pode-se obter que o coeficiente angular da reta de dV_{TH}/dT é de $-0,375$ mV/K. Este valor é muito próximo do valor obtido pela equação (2.26) e é também próximo do obtido pelo método de g_m/I_D , ou seja, mesmo com a redução da largura do *fin* o valor de dV_{TH}/dT obtido pela eq. (4.10) continua semelhante ao método g_m/I_D pois o termo quântico da eq. (2.26) não apresenta dependência com a temperatura. Desta forma, a variação de V_{TH} com “T” pode ser obtida para um transistor com W_{Fin} de 5 nm como um dispositivo convencional.

4.5 Aplicação de Tensão Mecânica

Os efeitos da aplicação de tensão mecânica foram analisados, inicialmente, nos dispositivos medidos e, posteriormente, foram simulados utilizando as ferramentas da Synopsys.

4.5.1 Dispositivos Medidos

Os dispositivos medidos possuem comprimento de canal de 10 μm , largura do *fin* variando entre 30 nm e 2870 nm e tensão mecânica biaxial intrínseca de 1,5 GPa. Na Figura 4.22 é exibida a transcondutância máxima obtida nos dispositivos com e sem a aplicação de tensão mecânica em função da largura do *fin*. Como a variação é aproximadamente linear, o aumento percentual de $g_{m,\text{max}}$ foi calculado com base nas retas aproximadas e pode ser visto na Figura 4.23. Pode-se notar que, para dispositivos mais largos, o aumento de $g_{m,\text{max}}$ chega a 83 %, enquanto que, no dispositivo mais estreito, é de 57 %. A diminuição do ganho de $g_{m,\text{max}}$ se deve à redução da componente da tensão mecânica na direção da largura do *fin* nos dispositivos mais estreitos [74] conforme apresentado no item 2.5.4. Ao se reduzir esta componente, o efeito da tensão mecânica total sobre o canal diminui.

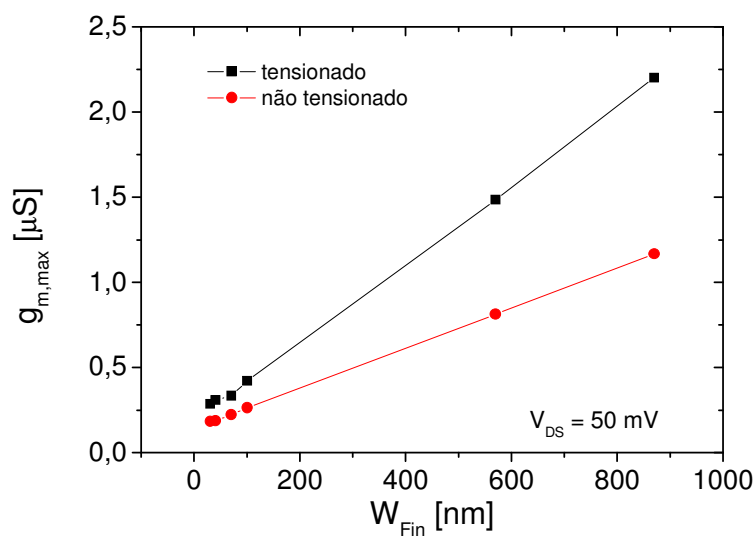


Figura 4.22 – Efeito da aplicação de tensão mecânica na transcondutância máxima dos dispositivos.

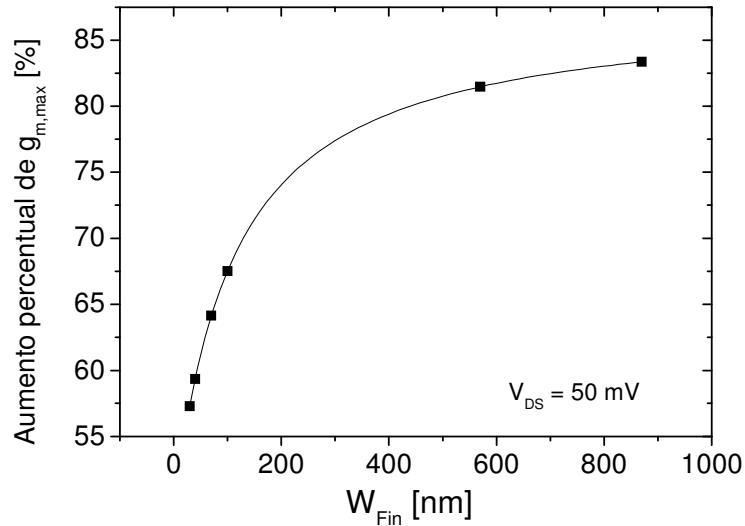


Figura 4.23 – Aumento percentual de $g_{m,max}$ com a aplicação de tensão mecânica nos dispositivos medidos.

A alteração na tensão de limiar, decorrente da presença ou não de tensão mecânica sobre o canal, também foi analisada. A Figura 4.24 mostra a tensão de limiar extraída utilizando o método da razão g_m/I_D para o dispositivo sob tensão mecânica comparado à um dispositivo sem a aplicação da mesma. Pode-se notar que a diferença entre V_{TH} com e sem tensão mecânica varia de acordo com a largura do *fin*, apresentando um valor menor nos dispositivos estreitos e maior nos dispositivos mais largos. Nos dispositivos estreitos, a tensão mecânica total sobre o canal diminui, reduzindo a variação na tensão de limiar. Já nos dispositivos mais largos, onde a tensão mecânica total é maior conforme apresentado no item 2.5.4, a variação em V_{TH} também é maior.

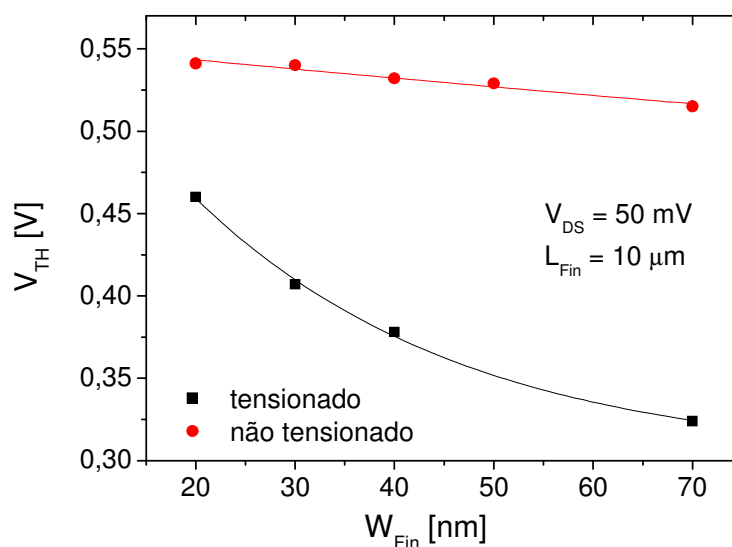


Figura 4.24 – Alteração em V_{TH} devido à aplicação de tensão mecânica em função da largura do *fin*.

4.5.2 Dispositivos Simulados

Inicialmente, foi simulada a aplicação de tensão mecânica constante, como forma de analisar se o simulador poderia contabilizar a dependência entre a tensão mecânica e as dimensões dos dispositivos através de seus modelos. Foi considerada diversas larguras de *fins*, comprimento de 90 nm e aplicação de +1,5GPa de tensão mecânica tanto na direção do comprimento do canal como na direção da largura do canal. A tensão mecânica na direção da altura do *fin* foi considerada nula. O sinal positivo indica que a pressão exercida é tensora enquanto que o sinal negativo indicaria compressão. A Figura 4.25 mostra a variação do aumento percentual da transcondutância. Pode-se notar que, nos dispositivos simulados, o efeito da tensão mecânica na mobilidade não depende das dimensões dos dispositivos. As equações (2.44) e (2.49) representam a forma como a tensão mecânica é gerada e como ela aumenta a mobilidade. Pode-se perceber que elas não possuem dependência com as dimensões. A Figura 4.26 mostra a variação da tensão de limiar com a largura do *fin* comparando-se o efeito da tensão mecânica. Novamente, pode-se notar que a variação em V_{TH} não depende da largura do *fin*.

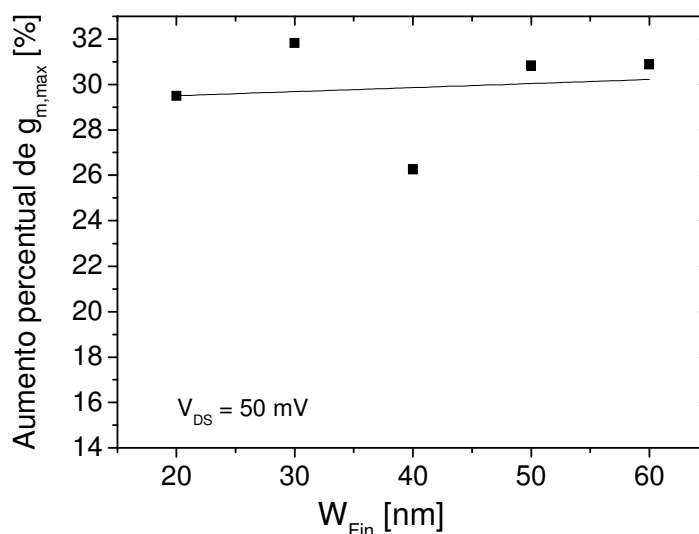


Figura 4.25 – Aumento percentual da transcondutância em função de W_{Fin} .

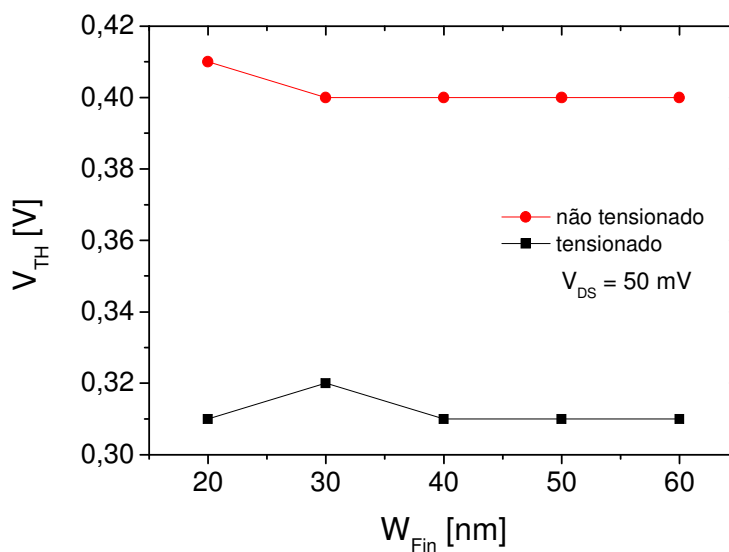


Figura 4.26 – Variação de V_{TH} com W_{Fin} nos dispositivos simulados com e sem efeito da tensão mecânica.

No entanto, a Figura 4.24 mostra que, nos dispositivos medidos, a variação de V_{TH} entre os dispositivos com e sem tensão mecânica muda conforme a largura do *fin*, aumentando à medida que W_{Fin} aumenta. Da mesma forma, é possível notar na Figura 4.23 que o aumento de transcondutância é maior para os dispositivos mais largos e diminui com a redução da largura do *fin*.

Essa variação ocorre devido ao relaxamento da tensão mecânica que ocorre durante o processo de fabricação. Nos dispositivos mais largos o relaxamento ocorre apenas nos cantos

superiores dos dispositivos. Nos dispositivos mais estreitos, esse relaxamento faz com que a componente de tensão na largura do transistor deixe de existir ou até mesmo se torne negativa, que indica compressão [74].

4.5.2.1 Estratégia de Simulação

A fim de se obter a dependência entre a tensão mecânica e as dimensões dos dispositivos sem a necessidade de simular o processo de fabricação dos mesmos, uma estratégia de simulação precisa ser adotada. Para simular o processo de fabricação seria necessária a introdução de outra ferramenta de simulação da Synopsys, o *Sentaurus Process*, além do conhecimento de variáveis de processo que não foram divulgadas pelo IMEC.

De acordo com o item 2.5.4, ao se diminuir a largura do *fin*, há um relaxamento tanto da tensão mecânica na direção da largura do canal como na direção do comprimento do mesmo. Isolando-se a tensão mecânica na equação (2.52), tem-se que:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{12} \\ R_{12} & R_{11} & R_{12} \\ R_{12} & R_{12} & R_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

onde R é a matriz das constantes elásticas de rigidez e é dada pelo inverso da matriz F ($R = F^{-1}$). Dessa forma, os coeficientes R_{11} e R_{12} serão dados, respectivamente, por $1,633 \times 10^{12}$ dina/cm² e $0,612 \times 10^{12}$ dina/cm².

Se houver um relaxamento da deformação ε_{xx} , que no caso indica a deformação na direção da largura do *fin*, haverá diminuição na tensão mecânica tanto na direção da largura do *fin* (σ_{xx}) como na direção do comprimento do canal (σ_{yy}), que está condizente com o apresentado no item 2.5.4. Pode-se, então, adotar uma função analítica para a deformação ε_{xx} que gere uma tensão mecânica conforme apresentado na Figura 2.14.

Considerando, primeiramente, que os dispositivos possuem tensão mecânica uniforme de 1,5 GPa e considerando que não há tensão mecânica na direção da altura do FinFET, pode-se

calcular a deformação em cada uma das três direções através da equação 2.54. As deformações calculadas são $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = 8,4 \times 10^{-3}$ e $\epsilon_{zz} = -6,3 \times 10^{-3}$.

Mantendo-se constante a deformação na direção do comprimento do canal (ϵ_{yy}) e a tensão mecânica na direção da altura do canal (σ_{zz}), pode-se analisar o efeito da variação da deformação ϵ_{xx} nas outras duas componentes da tensão mecânica, conforme apresentado na Figura 4.27.

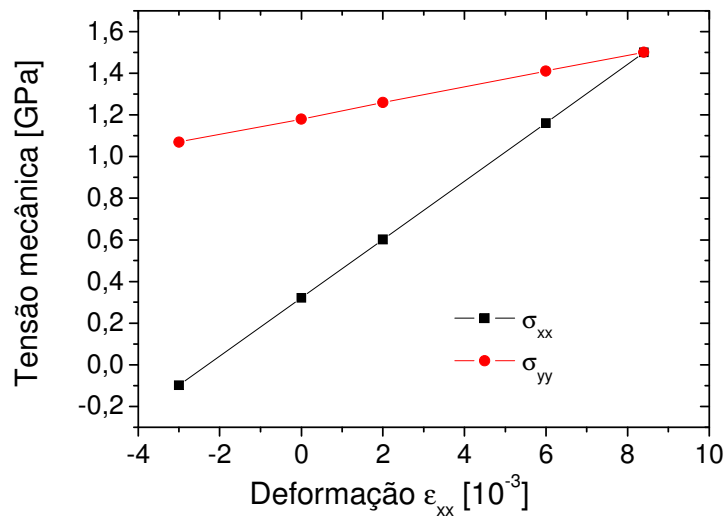


Figura 4.27 – Variação da tensão mecânica em função da deformação no eixo da largura do *fin*.

A fim de adotar uma função para a variação da deformação, devem-se analisar os pontos que irão determinar a função. Em um dispositivo largo, a tensão mecânica σ_{xx} deve ser aproximadamente nula na interface e ser de 1,5 GPa no centro do dispositivo. A variação entre esses dois pontos deve ocorrer em aproximadamente 100 nm, segundo a Figura 2.14 e a ref. [74]. Analisando a Figura 4.27, pode-se perceber que para se obter a tensão mecânica de 1,5 GPa e nula, considerando a deformação $\epsilon_{yy} = 8,4 \times 10^{-3}$, a deformação ϵ_{xx} será, respectivamente, de $8,4 \times 10^{-3}$ e -2×10^{-3} . Para a determinação do perfil desejado de acordo com a Figura 2.14, foi adotada a função de Boltzmann [97], que é descrita por:

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2 \quad (4.14)$$

onde A_1 e A_2 representam as assíntotas horizontais do início e do final da curva, respectivamente, x_0 representa o centro da curva onde $y = (A_1 + A_2)/2$ e dx está relacionado com a inclinação da função no ponto x_0 .

O ajuste da deformação pela função adotada será feito matematicamente. Para criar o perfil de deformação desejado, o *fin* será dividido em duas partes conforme a Figura 4.28. A função que será aplicada ao lado esquerdo, será aplicada de forma espelhada ao lado direito.

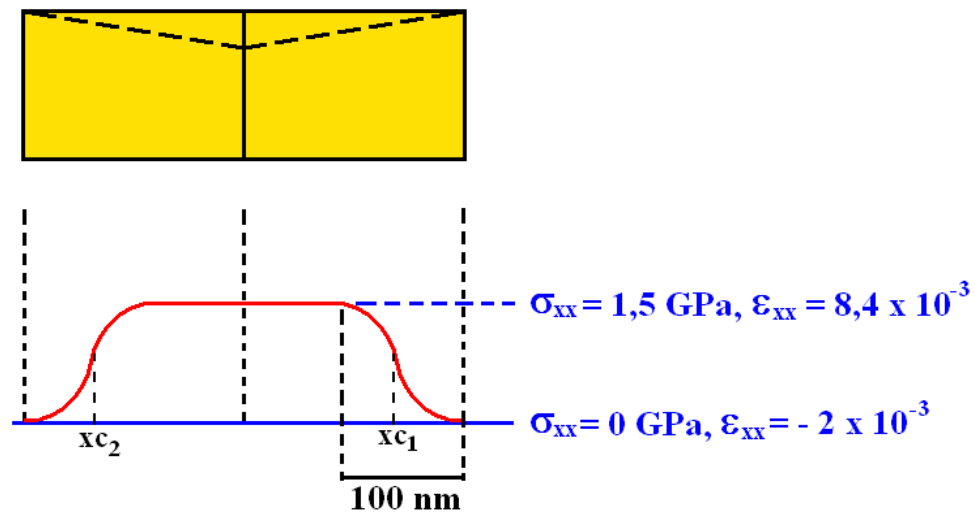


Figura 4.28 – Diagrama esquemático da aplicação da tensão mecânica através da função de Boltzmann para um dispositivo largo.

A partir da equação (4.14), podem-se escrever as funções utilizadas para a deformação:

$$\varepsilon_{xxD} = \frac{0,0084 + 0,002}{1 + e^{(x-xc_1)/dx}} + (-0,002) \text{ lado direito} \quad (4.15a)$$

$$\varepsilon_{xxE} = \frac{-0,002 - 0,0084}{1 + e^{(x-xc_2)/dx}} + 0,0084 \text{ lado esquerdo} \quad (4.15b)$$

onde ε_{xxD} e ε_{xxE} representam as funções para ε_{xx} para os lados direito e esquerdo respectivamente. As variáveis xc_1 e xc_2 estão à 50 nm de suas respectivas interfaces. A variável dx foi ajustada para 0,01 a fim de se obter a variação desejada dentro dos 100 nm.

Isolando as componentes da tensão mecânica σ_{xx} e σ_{yy} na equação (4.13) e simplificando, tem-se que:

$$\sigma_{xx} = \left(R_{11} - \frac{R_{12}^2}{R_{11}} \right) \varepsilon_{xx} + \left(R_{12} - \frac{R_{12}^2}{R_{11}} \right) \varepsilon_{yy} = 1,403 \times 10^{11} \varepsilon_{xx} + 3,826 \times 10^{10} \varepsilon_{yy} \quad (4.16a)$$

$$\sigma_{yy} = \left(R_{12} - \frac{R_{12}^2}{R_{11}} \right) \varepsilon_{xx} + \left(R_{11} - \frac{R_{12}^2}{R_{11}} \right) \varepsilon_{yy} = 3,826 \times 10^{10} \varepsilon_{xx} + 1,403 \times 10^{11} \varepsilon_{yy} \quad (4.16b)$$

Utilizando as equações (4.15a) e (4.16a) e considerando ε_{yy} constante e igual a $8,4 \times 10^{-3}$, pode-se obter a distribuição da tensão mecânica σ_{xx} resultante, que é dada pela Figura 4.29. Pode-se perceber que a função varia entre os pontos desejados (0 e 1,5 GPa) dentro do intervalo desejado (100 nm).

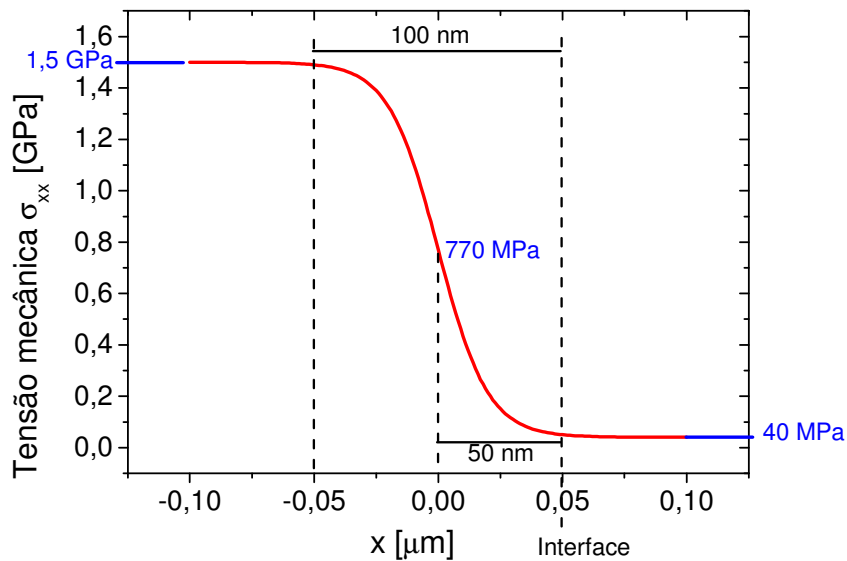


Figura 4.29 – Tensão mecânica σ_{xx} obtida através da aproximação pela equação de Boltzmann (equações (4.10a e 4.11a)).

A função será sempre aplicada da interface para o centro do dispositivo. Assim, em um dispositivo estreito ($W_{\text{Fin}} < 200$ nm) a tensão mecânica σ_{xx} não chegará em seu valor máximo de 1,5 GPa. A Figura 4.30 mostra a tensão mecânica σ_{xx} resultante para um dispositivo de 100 nm de largura do *fin*. O pico de tensão mecânica, que ocorre no centro da largura do canal, resulta

em aproximadamente 750 MPa, a metade da tensão mecânica no centro de um dispositivo mais largo como 1 μm .

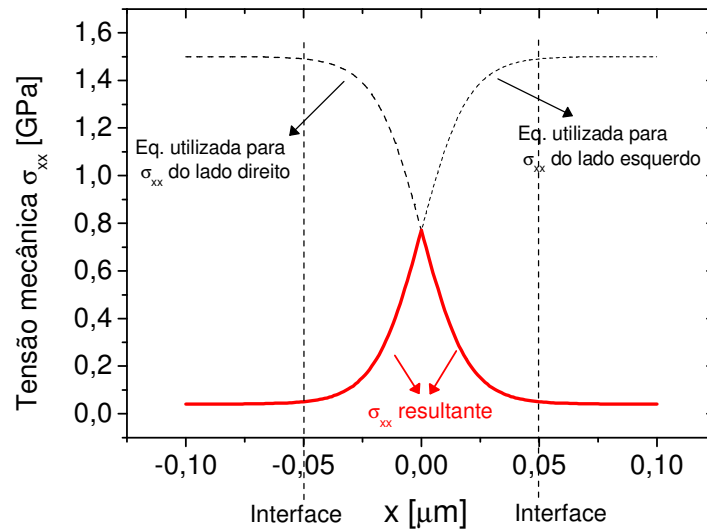
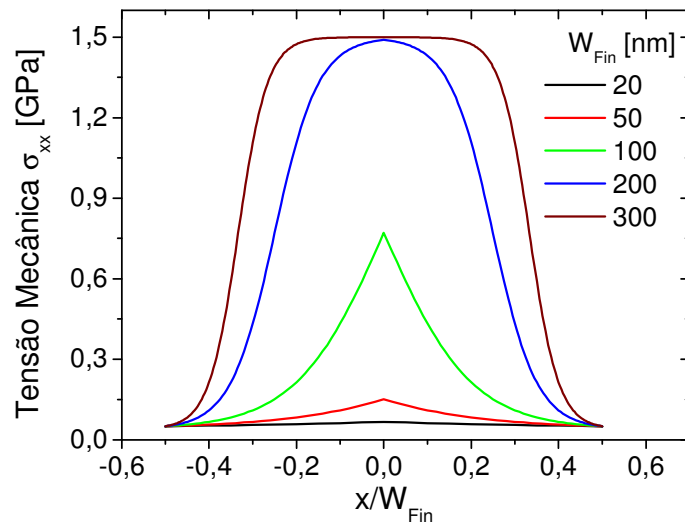
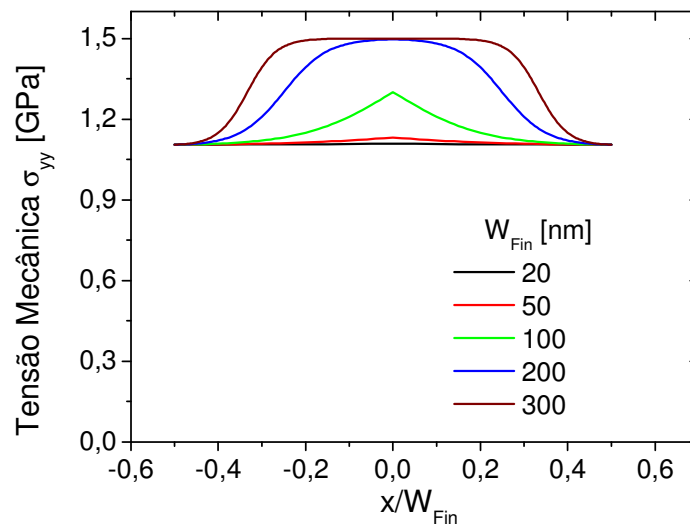


Figura 4.30 – Distribuição da tensão mecânica σ_{xx} em um dispositivo com $W_{Fin} = 100$ nm.

A Figura 4.31 mostra a tensão mecânica nas direções da largura (σ_{xx}) e do comprimento do canal para dispositivos com W_{Fin} variando entre 20 nm e 300 nm. O corte foi realizado na direção da largura do *fin* e é apresentado normalizado por W_{Fin} . Para o FinFET mais largo (300 nm), o dispositivo está tensionado biaxialmente, uma vez que as duas componentes possuem 1,5 GPa na região central do dispositivo, embora haja um relaxamento nas interfaces. Já o transistor mais estreito (20 nm) apresenta a componente σ_{xx} da tensão mecânica na ordem de 60 MPa enquanto que a componente σ_{yy} se mantém em 1,1 GPa. Este dispositivo, então, está tensionado uniaxialmente (uma vez que σ_{xx} é desprezível) e a sua componente σ_{yy} é menor que a mesma do dispositivo mais largo. Esses resultados concordam com as referências [73,74].



(A)



(B)

Figura 4.31 – Componentes σ_{xx} (A) e σ_{yy} (B) da tensão mecânica na direção da largura do *fin* normalizado pela largura do mesmo para dispositivos com W_{Fin} variando entre 20 nm e 300 nm.

Assim como a tensão mecânica biaxial depende da largura do *fin*, o comprimento do mesmo também altera a tensão mecânica efetiva ao qual os dispositivos estão submetidos. A referência [73] mostra que em um dispositivo com $W_{Fin} = 20$ nm e $L_{Fin} = 100$ nm não apresenta aumento de transcondutância máxima, indicando que este dispositivo não está tensionado. Dessa

forma, podem-se considerar equações análogas as (4.15), mas agora em função de y que é o eixo do comprimento de canal:

$$\varepsilon_{yyF} = \frac{0,0084 + 0,002}{1 + e^{(y-y_f)/dy}} + (-0,002) \text{ região da fonte} \quad (4.17a)$$

$$\varepsilon_{yyD} = \frac{-0,002 - 0,0084}{1 + e^{(y-y_d)/dy}} + 0,0084 \text{ região do dreno} \quad (4.17b)$$

onde ε_{yyF} e ε_{yyD} são as componentes de ε_{yy} que serão aplicadas nas regiões de fonte e dreno respectivamente. A variável dy foi adotada como sendo $dy = dx = 0,01$, e as variáveis y_f e y_d representam 50 nm para dentro do canal a contar a partir da fonte e do dreno, respectivamente.

Como foi mencionado e exibido na Figura 4.28, o *fin* foi dividido em duas regiões (direita e esquerda) para a aplicação da deformação na direção da largura do mesmo. Da mesma forma, para a aplicação da deformação na direção do comprimento do *fin*, ele será dividido em duas regiões: do centro a fonte e do centro ao dreno. Para a aplicação de ambas as deformações, o *fin* será dividido em quatro regiões no simulador que correspondem às combinações entre fonte e dreno com direita e esquerda conforme a Figura 4.32.

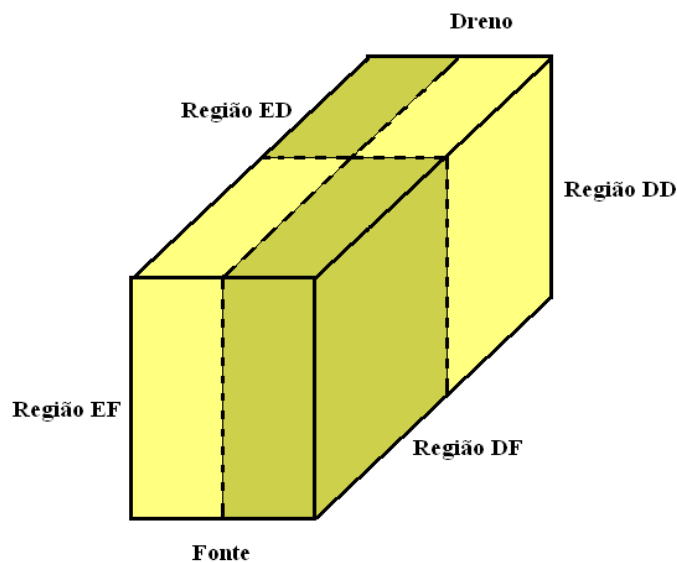


Figura 4.32 – Divisão do *fin* para a definição de deformação nas direções da largura e do comprimento do mesmo.

A tensão mecânica será dada pelas fórmulas (4.16) combinadas com as fórmulas (4.15a ou b) e (4.17a ou b) para cada região. Por exemplo, para o caso da região entre centro do *fin* e fonte do lado direito (Região DF na Figura 4.32), tem-se que σ_{xx} e σ_{yy} serão dados por:

$$\sigma_{xx} = 1,403 \times 10^{11} \left(\frac{0,0084 + 0,002}{1 + e^{(x-x_c1)/dx}} - 0,002 \right) + 3,826 \times 10^{10} \left(\frac{-0,002 - 0,0084}{1 + e^{(y-y_d)/dy}} + 0,0084 \right) \quad (4.18a)$$

$$\sigma_{yy} = 3,826 \times 10^{10} \left(\frac{0,0084 + 0,002}{1 + e^{(x-x_c1)/dx}} - 0,002 \right) + 1,403 \times 10^{11} \left(\frac{-0,002 - 0,0084}{1 + e^{(y-y_d)/dy}} + 0,0084 \right) \quad (4.18b)$$

4.5.2.2 Corrente de Dreno e Transcondutância

Após ser definido o modo como será considerada a dependência da tensão mecânica com as dimensões dos dispositivos, as curvas de corrente de dreno para os dispositivos com e sem a presença de tensão mecânica foram obtidas pelas simulações.

A Figura 4.33 mostra as curvas da corrente de dreno em função da tensão aplicada à porta em um dispositivo com $W_{Fin} = 20$ nm para diversas temperaturas. É possível notar claramente o aumento em I_D propiciado pela aplicação de tensão mecânica.

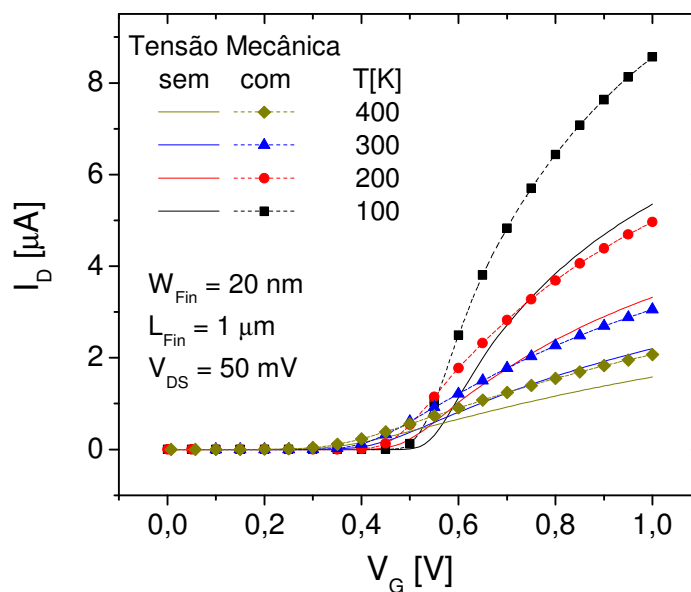


Figura 4.33 – Corrente de dreno em função da tensão aplicada à porta em um dispositivo com $W_{Fin} = 20$ nm, com e sem a presença de tensão mecânica, para diversas temperaturas.

Na Figura 4.34, é apresentada a transcondutância normalizada pela largura total W_t em função da sobretensão de porta V_{GT} para os dispositivos com $W_{Fin} = 20$ nm e $W_{Fin} = 1 \mu\text{m}$. A largura total W_t foi considerada como a somatória da largura das três portas.

A sobretensão de porta foi obtida pela diferença entre a tensão V_{GS} e a tensão de limiar extraída pelo método de g_m/I_D . Analisando-se inicialmente os dispositivos sem a presença de tensão mecânica, pode-se perceber que a transcondutância normalizada é maior para o dispositivo mais largo devido a condução ocorrer principalmente na porta superior que apresenta uma mobilidade maior que as portas laterais. No dispositivo de $W_{Fin} = 20$ nm, a condução ocorre, em sua maioria, pelas portas laterais. A aplicação da tensão mecânica faz com que ocorra um aumento em g_m/W_t , devido ao aumento da mobilidade, sendo que o aumento é maior para o dispositivo mais largo que apresenta uma tensão mecânica efetiva maior.

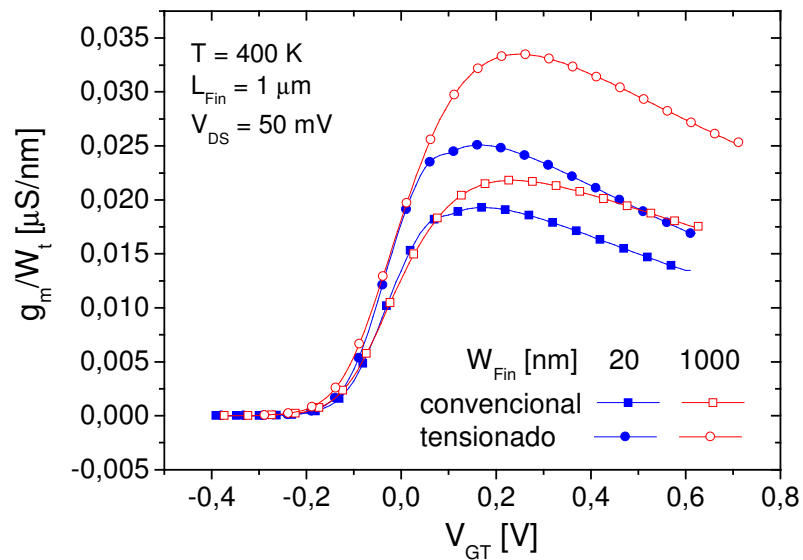


Figura 4.34 – Transcondutância normalizada pela largura total do dispositivo em função da sobretensão de porta.

A Figura 4.35 mostra o aumento percentual de $g_{m,max}$ em função da largura W_{Fin} . Pode-se observar que, com a redução da largura, ocorre uma redução no ganho de $g_{m,max}$ assim como foi observado nos dispositivos medidos na Figura 4.23.

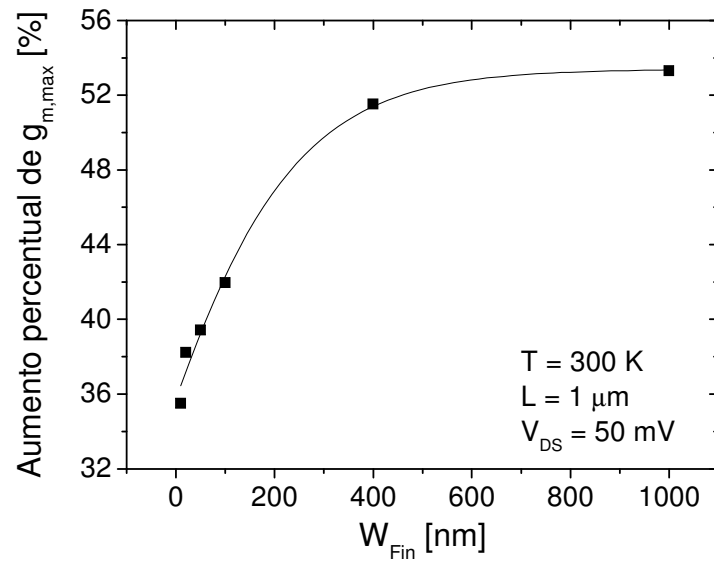


Figura 4.35 - Aumento percentual de $g_{m,max}$ com a aplicação de tensão mecânica nos dispositivos simulados com aplicação da tensão mecânica não-uniforme.

A Figura 4.36 exibe o aumento percentual da transcondutância em função do comprimento de canal em um dispositivo de $W_{Fin} = 20$ nm em temperatura ambiente extraída com V_{DS} de 100 mV.

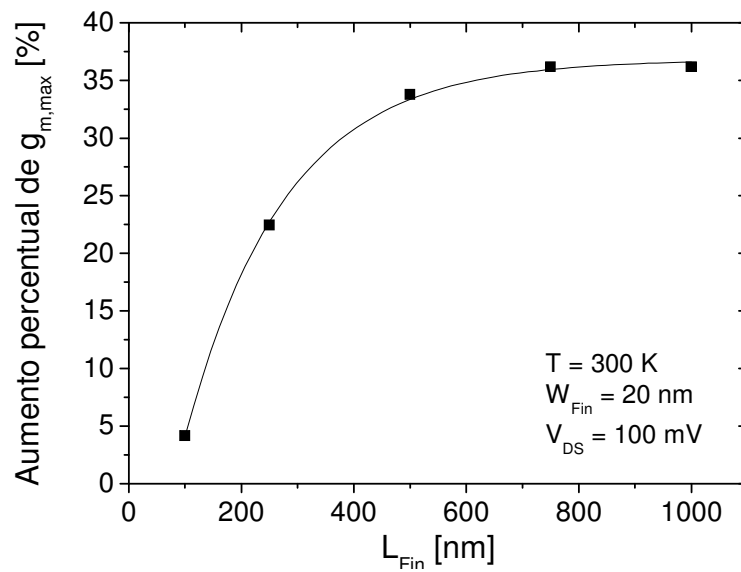


Figura 4.36 – Aumento percentual de $g_{m,max}$ em função do comprimento de canal.

Pode-se observar que praticamente não há ganho de transcondutância em um dispositivo com $L_{Fin} = 100$ nm. Isso ocorre pois como o dispositivo é estreito, a componente σ_{xx} (direção da largura do *fin*) já não existe mais. Com a redução de L_{Fin} , há também a redução de σ_{yy} fazendo com que o dispositivo já não esteja mais sob efeito de tensão mecânica. Nos dispositivos mais largos, o aumento percentual de $g_{m,max}$ tende a uma constante uma vez que eles estão sob o efeito de uma mesma componente σ_{yy} .

A Figura 4.37 apresenta a transcondutância normalizada pela largura total W_t em função de V_{GT} para os dispositivos medidos com $W_{Fin} = 70$ nm e $W_{Fin} = 570$ nm. Assim como nos resultados simulados, o valor máximo de g_m/W_t , sem aplicação de tensão mecânica, para o transistor mais largo ($W_{Fin} = 570$ nm), é maior que para o transistor mais estreito ($W_{Fin} = 70$ nm). Isso ocorre pois a parcela da corrente total que flui pela superfície superior é maior no dispositivo de 570 nm em relação ao de 70 nm, sendo que esta superfície apresenta uma mobilidade maior. Pode-se perceber também que o aumento em g_m/W_t , devido à tensão mecânica, é maior no dispositivo mais largo uma vez que este apresenta uma tensão mecânica efetiva maior que o de 70 nm.

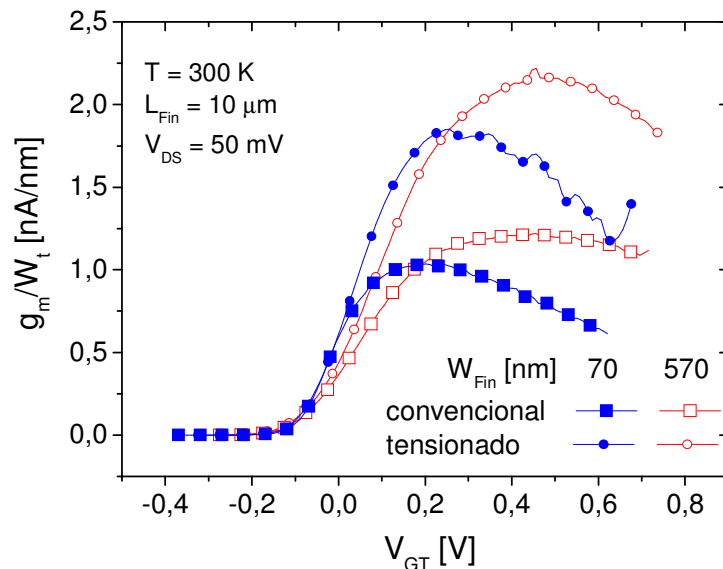


Figura 4.37 - Transcondutância normalizada pela largura total do dispositivo em função da sobre-tensão de porta obtida experimentalmente.

A Figura 4.38 mostra o aumento percentual de $g_{m,max}$ obtido em função de L_{Fin} para os dispositivos medidos com $V_{DS} = 100$ mV de acordo com a referência [73]. Nesta figura também

são rerepresentados os dados simulados da Figura 4.36. Os dispositivos medidos são compostos por 30 *fins* com $W_{Fin} = 20\text{nm}$ em paralelo. Pode-se perceber que, da mesma forma que nos dispositivos simulados, os dispositivos medidos com $L_{Fin} \cong 100\text{ nm}$ apresentam um ganho de $g_{m,max}$ praticamente nulo, mostrando que nesses dispositivos não há tensão mecânica agindo. Para os dispositivos mais largos, há uma tendência de ficar constante o ganho em $g_{m,max}$, assim como foi visto nos dispositivos simulados.

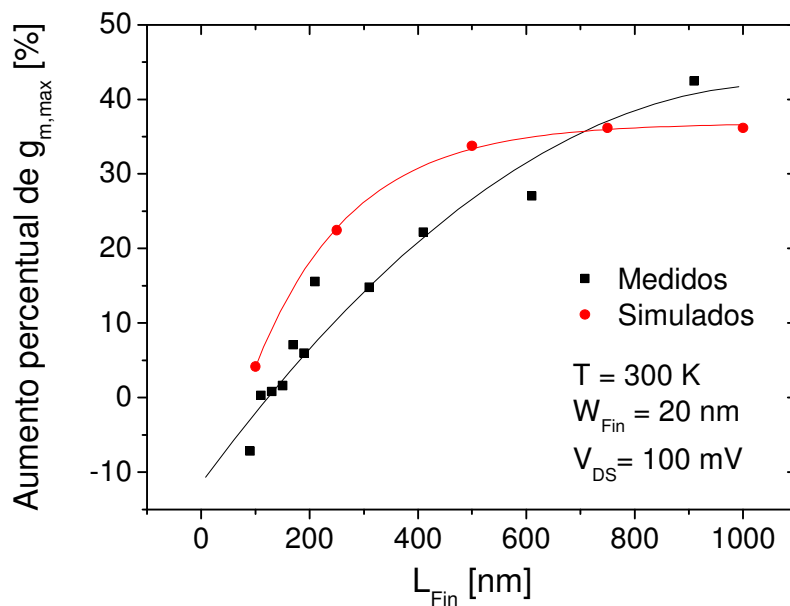


Figura 4.38 – Aumento percentual de $g_{m,max}$ em função do comprimento do canal em dispositivos medidos [73] em comparação com o resultado simulado da Figura 4.36.

4.5.2.3 Efeito da Tensão Mecânica na Tensão de Limiar

A Figura 4.39 mostra a variação da tensão de limiar com W_{Fin} considerando a influência da tensão mecânica. Pode-se observar que há uma redução em V_{TH} devido à tensão mecânica. Essa redução é maior nos dispositivos mais largos uma vez que estes apresentam uma tensão mecânica efetiva maior, da mesma forma que observado nos dispositivos medidos apresentados na Figura 4.24.

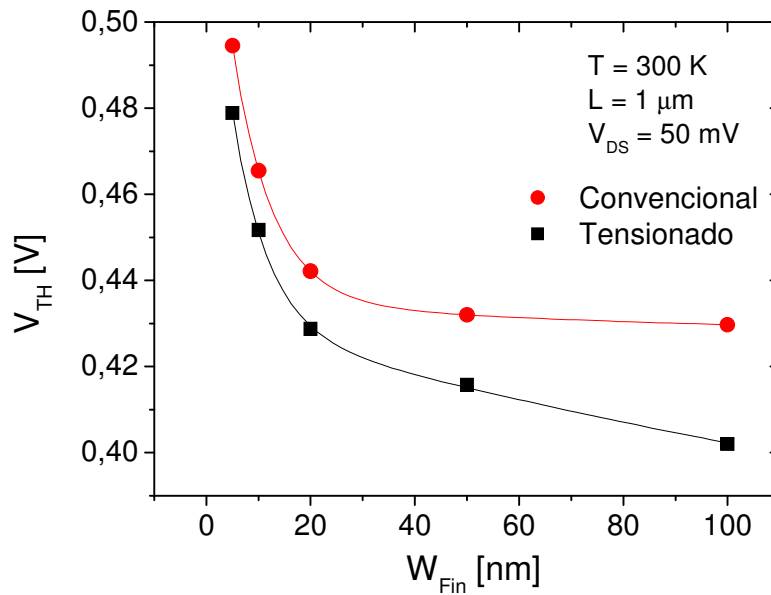


Figura 4.39 - Alteração em V_{TH} devido à aplicação de tensão mecânica não uniforme em função da largura do *fin* nos dispositivos simulados.

Conforme foi mencionado no item 2.4.2.1, a tensão de limiar aumenta com a redução da temperatura. Por outro lado, a tensão mecânica é responsável por uma diminuição da tensão de limiar (Figura 4.39) e com a redução da temperatura a tensão mecânica se torna mais efetiva [98].

A tensão de limiar foi extraída utilizando o método da razão g_m/I_D e o método da segunda derivada para dispositivos com e sem a presença de tensão mecânica em função da temperatura [99]. A Figura 4.40 mostra a tensão de limiar obtida por meio de simulação em função da temperatura para o dispositivo de 1 μm de largura e 1 μm de comprimento.

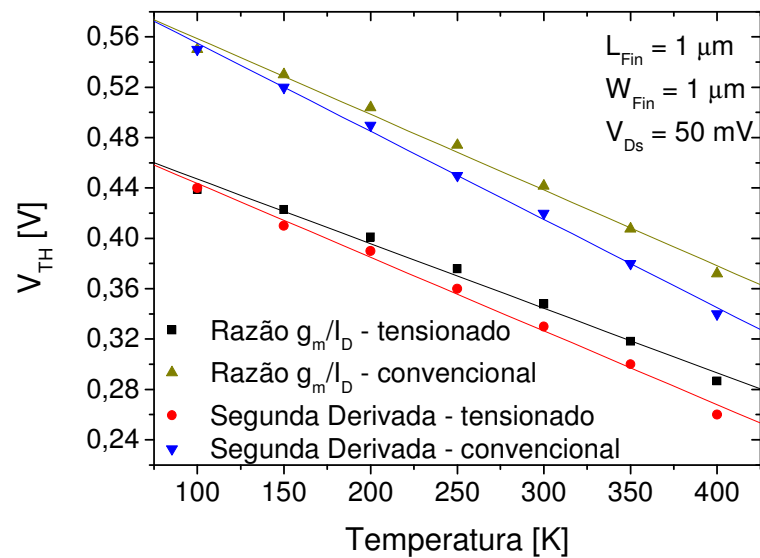


Figura 4.40 – Tensão de limiar em função da temperatura para um dispositivo simulado de $W_{Fin} = L_{Fin} = 1 \mu\text{m}$ com e sem a aplicação de tensão mecânica.

Na Tabela 4.4 são apresentados os coeficientes angulares da aproximação linear da variação dV_{TH}/dT apresentada na Figura 4.40. Pode-se observar que a variação da tensão de limiar com a temperatura é menor para os dispositivos tensionados que para os dispositivos convencionais utilizando-se ambos os métodos de extração. Pelo método da razão de g_m/I_D , esta redução foi próxima de 15% enquanto pelo método da segunda derivada foi aproximadamente 16%.

Tabela 4.4 – Variação dV_{TH}/dT e redução percentual desta variação obtidas dos dados da Figura 4.40.

| Método de extração | Variação dV_{TH}/dT [mV/K] | | Redução de dV_{TH}/dT com a presença de tensão mecânica [%] |
|--------------------|------------------------------|--------------|---|
| | Tensionado | Convencional | |
| Razão g_m/I_D | -0,513 | -0,602 | 14,8% |
| Segunda Derivada | -0,586 | -0,700 | 16,3% |

A Figura 4.41 mostra a variação dV_{TH}/dT obtida para diversas larguras de *fin* (entre 5 nm e 1 μm) mantendo-se o comprimento do canal constante. Nos dados para os dispositivos de 5 nm e 10 nm foram considerados os efeitos quânticos nas simulações. Pode-se notar que os dispositivos tensionados sempre apresentam a variação $|dV_{TH}/dT|$ menor que os dispositivos

convencionais. No entanto, esta redução é maior para os dispositivos mais largos que para os dispositivos mais estreitos, pois nos primeiros a tensão mecânica efetiva é maior que nos segundos. É possível observar também que a redução em $|dV_{TH}/dT|$ entre os dispositivos sem e com tensão mecânica se mantém praticamente constante para *fins* com a largura entre 5 nm e 20 nm pois em todos eles a componente σ_{xx} da tensão mecânica é praticamente nula, estando apenas tensionados na direção do comprimento do canal.

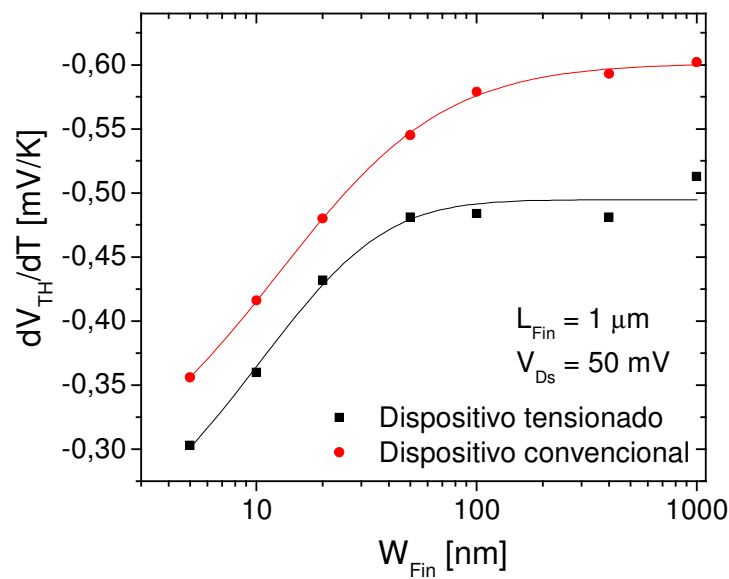


Figura 4.41 – Variação dV_{TH}/dT em função da largura W_{Fin} para um dispositivo simulado de $L_{Fin} = 1 \mu m$ com e sem a presença de tensão mecânica.

A fim de se analisar qual efeito da tensão que seria o principal responsável pela redução em dV_{TH}/dT , foram realizadas simulações considerando algumas combinações de modelos analíticos conforme apresentado na Figura 4.42. Foram considerados os casos: sem qualquer efeito de tensão mecânica, os efeitos da tensão mecânica apenas na mobilidade, os efeitos na mobilidade e na massa efetiva (conseqüentemente densidade de estados) e todos os efeitos da tensão mecânica (mobilidade, massa efetiva (densidade de estados (DOS - *Density of States*)) e energias de valência e condução) A variação dV_{TH}/dT extraídas desta figura são apresentadas na Tabela 4.5. Nestas simulações foram consideradas largura W_{Fin} de 20 nm e comprimento de 1 μm e a tensão de limiar foi extraída utilizando-se apenas o método da razão g_m/I_D .

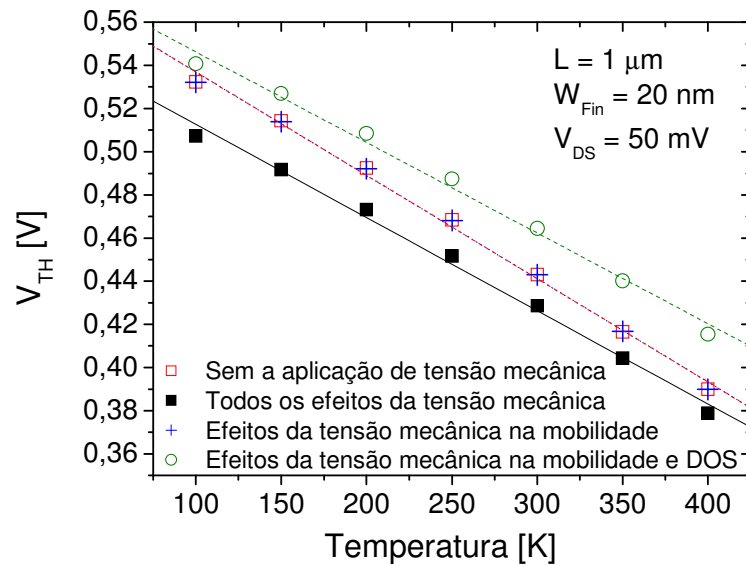


Figura 4.42 – Tensão de limiar em função da temperatura para um dispositivo com $W_{Fin} = 20 \text{ nm}$ e $L_{Fin} = 1 \mu\text{m}$ considerando algumas combinações de modelos dos efeitos causados pela aplicação de tensão mecânica.

Tabela 4.5 – Variação dV_{TH}/dT obtida pela Figura 4.42 para as diferentes combinações de modelos relacionados aos efeitos da tensão mecânica.

| Modelos analíticos utilizados nas simulações | | | dV_{TH}/dT [mV/K] |
|--|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Mobilidade dos portadores | Massa efetiva e densidade de estados | Energias de valência e condução | |
| | | | -0,480 |
| X | X | X | -0,432 |
| X | | | -0,479 |
| X | X | | -0,424 |

Pode-se perceber que no caso onde foi considerado todos os efeitos da tensão mecânica (segunda linha da tabela) e no caso onde foram considerados os efeitos na mobilidade e na massa efetiva (e conseqüentemente densidade-de-estados) (quarto caso), as variações dV_{TH}/dT foram similares. Já nos casos onde foi considerado apenas os efeitos na mobilidade (terceiro caso) e onde não foi contabilizado qualquer efeito da tensão mecânica (primeiro caso), as variações dV_{TH}/dT foram as mesmas. Pode-se, então, concluir que os efeitos nas massas efetivas e, conseqüentemente, na densidade de estados, são os responsáveis pela redução na variação de V_{TH} com “T” nos dispositivos sob efeito de tensão mecânica.

Pela Figura 4.42, pode-se ainda notar que há uma redução de V_{TH} quando são comparados os segundo e quarto casos, indicando que o efeito da tensão mecânica nas energias de valência e condução são os responsáveis pela redução de V_{TH} . Quando são comparados os dois últimos casos, pode-se concluir que o efeito da tensão mecânica na massa efetiva aumenta um pouco a tensão de limiar, mas esse aumento é superação pela redução devido às energias de valência e condução.

Na Tabela 4.6 são apresentados os coeficientes angulares das retas aproximadas para a variação dV_{TH}/dT obtidas por meio de medidas experimentais. Pode-se observar que há uma redução em dV_{TH}/dT nos dispositivos tensionados em relação aos convencionais. Esta redução para o dispositivo mais largo ($W_{Fin} = 570$ nm) é de 20% enquanto que para o dispositivo mais estreito ($W_{Fin} = 30$ nm) esta variação é de 3%, mostrando que, da mesma forma que nos dispositivos simulados, quanto maior a tensão mecânica efetiva que age no dispositivo, menor a dependência da tensão de limiar na temperatura. No entanto, os valores obtidos são menores que os simulados. Da mesma forma que no item 4.4.3, isso pode estar relacionado com as dimensões dos dispositivos (W_{Fin} e t_{ox}), que se forem menores nos dispositivos medidos irão levar à uma variação dV_{TH}/dT menor.

Tabela 4.6 – Variação dV_{TH}/dT e redução percentual desta variação obtidas para os dispositivos medidos com e sem a presença de tensão mecânica.

| W_{Fin} [nm] | dV_{TH}/dT [mV/K] | | Redução de dV_{TH}/dT com a presença de tensão mecânica [%] |
|-------------------|---------------------|--------------|---|
| | Tensionado | Convencional | |
| 30 | -0,365 | -0,377 | 3,2 |
| 570 | -0,428 | -0,538 | 20,4 |

4.5.2.4 Dependência da Transcondutância Máxima com a Temperatura

A transcondutância máxima foi extraída nas simulações dos dispositivos com e sem a presença de tensão mecânica, com $V_{DS} = 50$ mV. A Figura 4.43 mostra a transcondutância máxima obtida para um dispositivo com $W_{Fin} = 20$ nm em função da temperatura, bem como o aumento percentual da transcondutância máxima do dispositivo tensionado em relação ao convencional em função de T. Pode-se observar que há um aumento do ganho de $g_{m,max}$

conforme a temperatura é reduzida. Este aumento de ganho era esperado conforme a referência [100] e pode ser explicado pelos coeficientes piezoresistivos. De acordo com o item 2.5.2, a variação na mobilidade é dada em função dos coeficientes piezoresistivos conforme a equação (2.50). De acordo com a referência [101], os coeficientes piezoresistivos possuem dependência com a concentração de impurezas e com a temperatura. Por conta desta dependência, os coeficientes piezoresistivos devem ser multiplicados por um fator. De acordo com [101], ao se reduzir a temperatura, para baixa concentração de dopantes, este fator passa a ser maior que 1, aumentando os coeficientes piezoresistivos. Dessa forma, pela equação (2.50), tem-se que o ganho de mobilidade será maior.

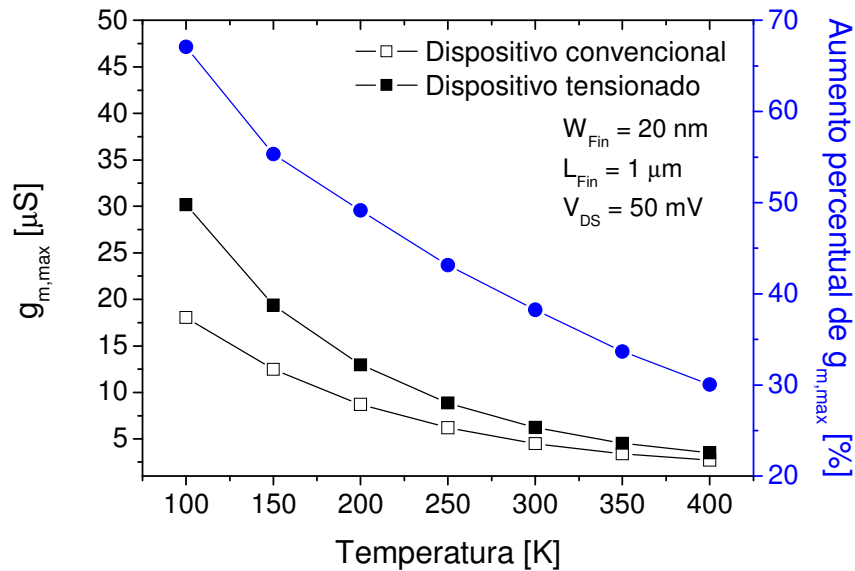


Figura 4.43 – Transcondutância máxima *versus* temperatura para um dispositivo de $W_{Fin} = 20\text{ nm}$ e $L = 1\text{ }\mu\text{m}$ com e sem a presença de tensão mecânica e aumento percentual de $g_{m,max}$ *versus* a temperatura.

A Figura 4.44 mostra o aumento percentual de transcondutância em função da temperatura para diversas larguras de *fin*. Pode-se perceber que o aumento percentual é maior para o dispositivo mais largo em toda a faixa de temperatura, uma vez que este transistor apresenta uma tensão mecânica efetiva maior. No entanto, pode-se notar que, ao reduzir a temperatura, a diferença entre o ganho de $g_{m,max}$ para o dispositivo mais largo e para os mais estreitos diminui.

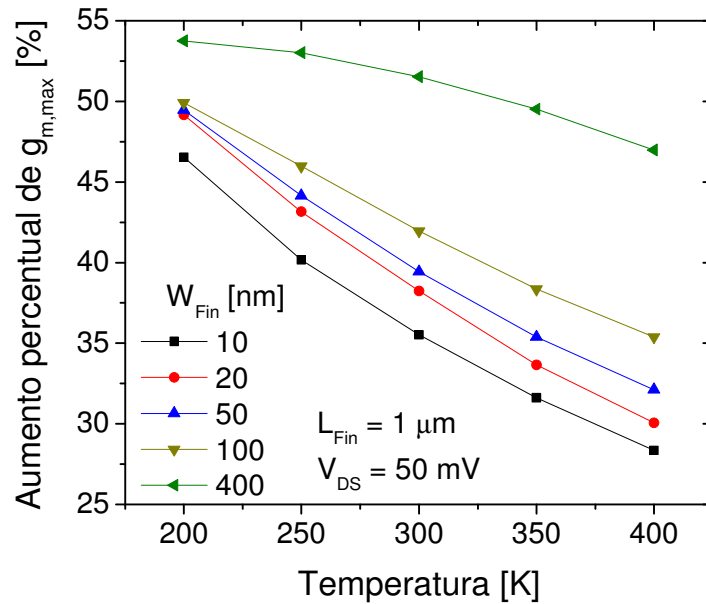


Figura 4.44 – Aumento percentual de $g_{m,max}$ em função da temperatura para diversas larguras de fin .

A Figura 4.45 apresenta o aumento percentual da transcondutância em função de W_{Fin} para diversas temperaturas. Através desta figura é possível notar que, ao se reduzir a temperatura, o ganho de $g_{m,max}$ tende a variar menos com a largura do fin . Em 400 K, a diferença entre os aumentos percentuais de $g_{m,max}$ dos dispositivos de $W_{Fin} = 400$ nm e $W_{Fin} = 10$ nm foi de 19 %, enquanto que em 200 K essa diferença foi de 7 %.

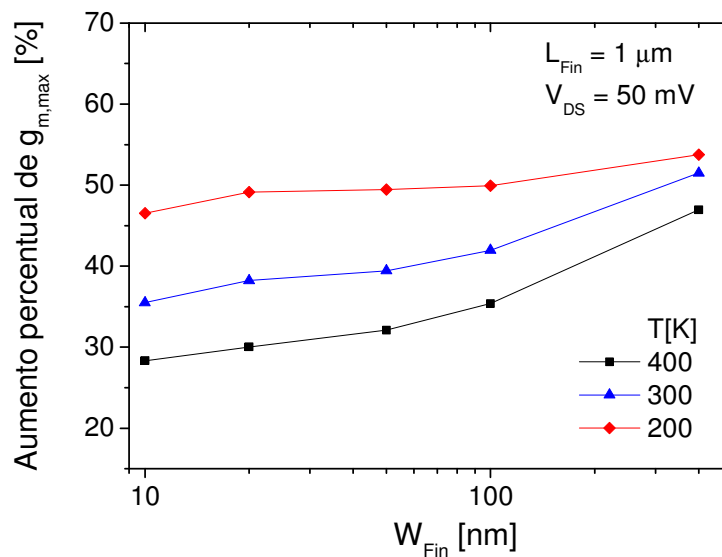


Figura 4.45 – Aumento percentual de $g_{m,max}$ em função de W_{Fin} para diversas temperaturas.

4.5.2.5 Dependência da Inclinação da Sublimiar com a Temperatura

A Figura 4.46 mostra a inclinação de sublimiar em função da temperatura (de 100 K a 400 K) para diversas larguras de *fin* (entre 20 nm e 1 μm) com e sem a presença de tensão mecânica. A inclinação foi obtida da mesma forma como descrito no item 4.2. Pode-se observar que nas simulações a presença de tensão mecânica não afeta a inclinação de sublimiar. Da mesma forma que nos dispositivos sem a aplicação de tensão mecânica, *S* é maior para os dispositivos mais largos e se aproxima mais do limite teórico com a redução da temperatura.

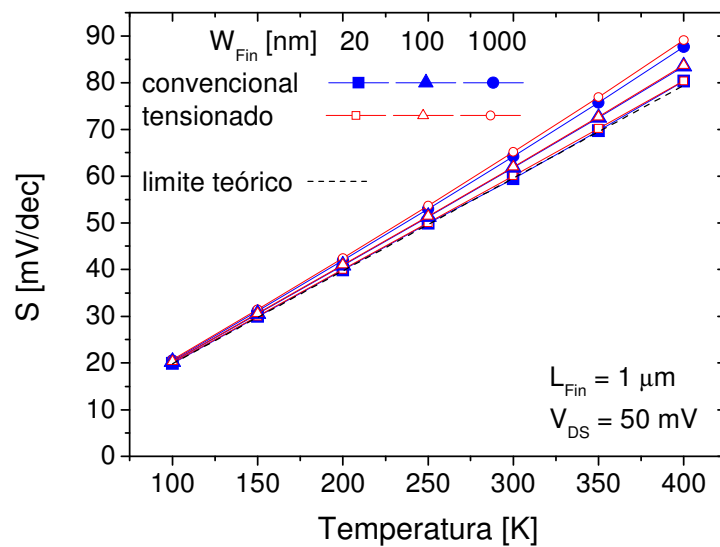


Figura 4.46 – Inclinação de sublimiar em função da temperatura para dispositivos com e sem a presença de tensão mecânica.

A Figura 4.47 mostra a inclinação de sublimiar obtida nos dispositivos medidos com $W_{\text{Fin}} = 570 \text{ nm}$ com e sem a presença de tensão mecânica e comparados ao limite teórico. Embora os resultados medidos sejam ligeiramente maiores que o limite teórico enquanto que nos dispositivos simulados os resultados estejam muito próximos deste limite, os valores obtidos não sofrem mudança significativa com e sem a presença de tensão mecânica, da mesma forma que ocorre nos dispositivos simulados.

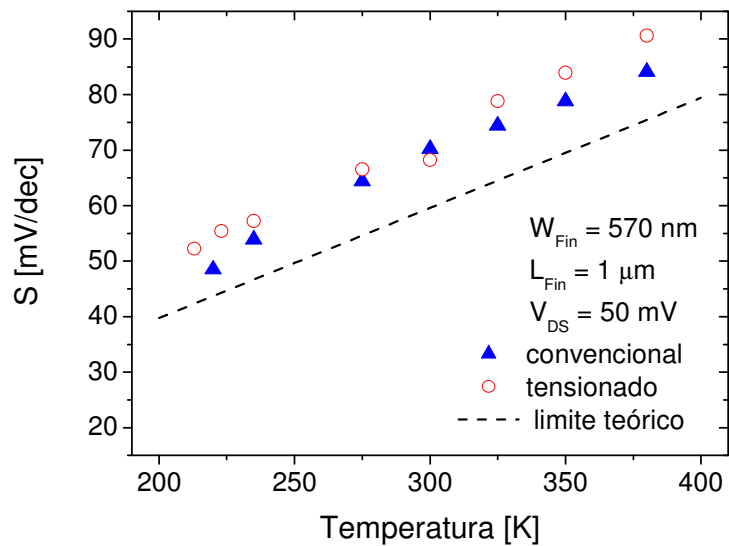


Figura 4.47 - Inclinação de sublimar em função da temperatura para um dispositivo medido com e sem a presença de tensão mecânica.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No estudo apresentado, foi realizada a análise dos transistores FinFET em função da temperatura, avaliando o efeito da aplicação de tensão mecânica. Para realizar o estudo foram utilizados dois simuladores numéricos (Atlas e Sentaurus) e medidas experimentais de dispositivos fabricados no *Interuniversity Microelectronics Center* – IMEC, Leuven, Bélgica.

As primeiras simulações foram realizadas utilizando o simulador Atlas a fim de se verificar a influência da temperatura. Foi possível observar o aumento da mobilidade e da tensão de limiar com a redução da temperatura, bem como a redução da inclinação de sublimiar.

Na seqüência, foi dado início à etapa de análise da tensão de limiar dos dispositivos. Para tal, foram utilizados dois métodos de extração: o método clássico da segunda derivada e um segundo método através da razão g_m/I_D como forma de utilizar a condição física na qual as componentes de deriva e difusão da corrente são iguais. Ao se comparar ambos os métodos com um modelo analítico, foi possível observar que V_{TH} obtido pelo método clássico apresenta uma variação com a temperatura maior que o método de g_m/I_D , sendo que este segundo apresenta valores muito próximos ao do modelo analítico para todas as larguras de *fin* analisadas. O potencial de superfície na condição de limiar para cada um dos métodos foi extraído e comparado com outro modelo de potenciais, mostrando que o método da razão g_m/I_D apresenta variação de potenciais com a temperatura mais próximo do modelo que o método clássico. O modelo de potenciais utilizado na comparação tem a vantagem de ser contínuo entre as regiões de operação.

Como a variação da tensão de limiar com a temperatura se mostrou, através das curvas, aproximadamente linear, foi realizada a expansão em série de Taylor da equação do modelo analítico. Dessa forma, chegou-se a conclusão que as espessuras do óxido de porta e da camada de silício influenciam esta variação. Ao se reduzir tanto uma como a outra, a variação com a temperatura diminui. E caso se reduza ambas os efeitos são somados.

A variação da tensão de limiar com a temperatura também foi analisada nos dispositivos medidos. Os resultados observados mostram que, de fato, o método da segunda derivada apresenta uma variação da tensão de limiar com a temperatura maior que o método da razão de g_m/I_D .

Então, foi efetuado o estudo da aplicação de tensão mecânica nos dispositivos. Primeiramente, foram analisados os dispositivos medidos, onde foi possível perceber que o aumento percentual de transcondutância e a variação na tensão de limiar diminuem com a largura do *fin*, mostrando que a tensão mecânica possui dependência com as dimensões dos dispositivos. Através da simulação do efeito da tensão mecânica no Sentaurus, pode-se concluir que a aplicação de uma tensão constante de 1,5 GPa em dispositivos com diversas larguras de *fin*s, produz uma diferença entre os dispositivos com e sem *strain* que se mantém constante com W_{Fin} tanto na tensão de limiar como na transcondutância.

Assim, foi adotada uma equação, com base no estudo bibliográfico, para a variação da deformação com as dimensões dos dispositivos, como forma de representar o relaxamento que ocorre durante o processo de fabricação.

Criada a dependência entre tensão mecânica e dimensões, foram analisados os dados obtidos das simulações juntamente com as medidas realizadas. A análise iniciou-se com as curvas da corrente de dreno e transcondutância em função da tensão aplicada à porta. Através dessas curvas, foi possível observar o aumento de mobilidade e a redução da tensão de limiar devido à aplicação da tensão mecânica. Também foi possível notar a diferença entre os ganhos de $g_{m,max}$ em relação à largura dos dispositivos, uma vez que o dispositivo mais largo (1 μm) apresentou um ganho de 53 % enquanto que o ganho para o transistor mais estreito (20 nm) foi de 36 %. A redução do comprimento do canal também reduz a tensão mecânica efetiva como foi visto tanto por simulações como por meio dos resultados experimentais.

Na seqüência, foi analisada a influência da tensão mecânica na variação da tensão de limiar com a temperatura. Foi possível perceber que a aplicação de tensão mecânica diminui a variação dV_{TH}/dT , ou seja, a tensão de limiar nos dispositivos tensionados possui uma menor dependência com a temperatura. Para os transistores mais largos, essa redução em dV_{TH}/dT é maior que para os dispositivos mais estreitos devido a maior tensão mecânica agindo na direção da largura dos mesmos. Foram realizadas simulações considerando diferentes combinações de modelos, onde foi possível observar que a redução da tensão de limiar nos dispositivos tensionados ocorre devido a variação nas energias de valência e condução enquanto que a redução na variação dV_{TH}/dT se deve aos efeitos da tensão mecânica na densidade de estados. Os resultados experimentais confirmaram esta menor dependência de V_{TH} na temperatura para os dispositivos tensionados uma vez que houve uma redução de 20,4 % na variação dV_{TH}/dT para os dispositivos de 570 nm de largura.

Foi também analisada a dependência do ganho de transcondutância máxima com a temperatura nos dispositivos. Ao se reduzir a temperatura, há um aumento no ganho de $g_{m,max}$ para todos os dispositivos, no entanto, esse aumento é maior nos dispositivos mais estreitos. Por fim, foi analisada a dependência da inclinação de sublimar com a temperatura nos dispositivos com e sem a presença de tensão mecânica. A inclinação de sublimar não foi afetada pela aplicação de tensão mecânica nos dispositivos.

Como continuidade do trabalho, sugere-se analisar as variáveis analógicas dos dispositivos FinFET operando em saturação em função da temperatura, com e sem a aplicação de tensão mecânica, tanto por meio de simulações numéricas como por resultados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COLINGE, J. P.; **Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI**, Boston, Kluwer Academic Publishers, 3ª edição, 366 p., 2003.
- [2] HISAMOTO, D.; KAGA, T.; KAWAMOTO, Y.; TAKEDA, E.; A fully depleted lean-channel transistor (DELTA) - A novel vertical ultra thin SOI MOSFET, **Technical Digest of IEDM**, p. 833-836, 1989.
- [3] HISAMOTO, D.; WEN-CHIN, L.; KEDZIERSKI, J.; TAKEUCHI, H. *et al.*; FinFET – A self-aligned double-gate MOSFET scalable to 20 nm, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 47, n. 12, p. 2320-2325, 2000.
- [4] GUTIERREZ, E. A.; DEEN, J.; CLAEYS, C. L.; **Low Temperature Electronics: Physics, Devices, Circuits and Applications**, Academic Press, 964p., 1991.
- [5] PAVANELLO, M. A.; MARTINO, J. A.; SIMOEN, E.; CLAEYS, C.; Cryogenic operation of FinFETs aiming at analog applications, to be published in **Cryogenics**, 2009.
- [6] SUBRAMANIAN, V.; MERCHA, A.; PARVAIS, B.; LOO, J. *et al.*; Impact of fin width on digital and analog performances of n-FinFETs, **Solid-State Electronics**, v. 51, n. 4, p. 551-559, 2007.
- [7] RIM, K.; ANDERSON, R.; BOYD, D., CHAN, K. *et al.*; Strained Si CMOS (SS CMOS) technology: opportunities and challenges, **Solid-State Electronics**, v. 47, n. 7, p. 1133-1139, 2003.
- [8] HOYT, J. L.; NAYFEH, H. M.; EGUCHI, S.; ABERG, I. *et al.*; Strained silicon MOSFET technology, **IEDM Digest of Technical Papers**, p. 23-26, 2002.

- [9] GALLON, C.; FENOUILLET-BERANGER, C.; DENORME, S.; BOEUF, F. *et al.*; Mechanical and electrical analysis of strained liner effect in 35 nm fully depleted silicon-on-insulator devices with ultra thin silicon channels, **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 45, n. 4B, p. 3058-3063, 2006.
- [10] NAYFEH, H. M.; SINGH, D. V.; HEGENROTHER, J. M.; SLEIGHT, J. W. *et al.*; Effect of tensile uniaxial stress on the electron transport properties of deep scaled FD-SOI n-type MOSFETs, **IEEE Electron Device Letters**, v. 27, n. 4, p. 288-290, 2006.
- [11] LAUER, I.; ANTONIADIS, D.; Enhancement of electron mobility in ultrathin-body silicon-on-insulator MOSFETs with uniaxial strain, **IEEE Electron Device Letters**, v. 26, n. 5, p. 314-316, 2005.
- [12] MIZUNO, T.; SUGIYAMA, N.; TEZUKA, T.; NUMATA, T. *et al.*; High-performance strained SOI CMOS devices using thin film SiGe-on-insulator technology, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 50, n. 4, p. 988-994, 2003.
- [13] ATLAS User's Manual, SILVACO (2008).
- [14] Sentaurus Device, SYNOPSYS (2009).
- [15] SZE, S. M.; **Physics of Semiconductor Devices**, 2nd Ed., New York, John Wiley and Sons, 868 p., 1981.
- [16] KRISHNAN, S.; FOSSUM, J. G.; Grasping SOI floating-body effects, **IEEE Circuits and Devices Magazine**, v. 14, n. 4, p. 32-37, 1998.
- [17] KISTLER, N.; WOO, J.; Detailed characterization and analysis of the breakdown voltage in fully depleted SOI n-MOSFET's, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 41, n. 7, p. 1217-1221, 1994.

- [18] YOSHIMI, M.; Two-dimensional simulation and measurement of high-performance MOSFETs made on a very thin SOI film, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 36, n. 3, p. 493-503, 1989.
- [19] YOUNG, K. K.; Short-channel effect in fully depleted SOI MOSFETs, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 36, n. 2, p. 399-402, 1989.
- [20] LIM, H. K.; FOSSUM, J. G.; Threshold voltage of thin-film silicon-on-insulator (SOI) MOSFET's, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 30, n. 10, p. 1244-1251, 1983.
- [21] SEKIGAWA, T.; HAYASHI, Y.; Calculated threshold voltage characteristic of an X MOS transistor having an additional bottom gate, **Solid-State Electronics**, v. 27, n. 8/9, p. 827-828, 1984.
- [22] HUANG, X.; LEE, W. C.; KUO, C.; HISAMOTO, D. *et al.*; Sub 50-nm FinFET: PMOS, **Technical Digest of IEDM**, p. 67-70, 1999.
- [23] COLINGE, J. .P.; GAO, M. H.; ROMANO, A.; MAES, H.; CLAEYS, C.; Silicon-on-Insulator "Gate-All-Around Device", **Technical Digest of IEDM**, p. 595-598, 1990.
- [24] LEE, C. W.; AFZALIAN, A.; AKHAVAN, N. D.; YAN, R. *et al.*; Junctionless multigate field-effect transistor, **Applied Physics Letters**, v. 94, p. 053511:1-2, 2009.
- [25] PARK, J. T.; COLINGE, J. P.; DIAZ, C. H.; Pi-gate SOI MOSFET, **IEEE Electron Device Letters**, v. 22, p. 405, 2001.
- [26] YANG, F. L.; CHEN, H. Y.; CHENG, F. C.; HUANG, C. C. *et al.*; 25 nm CMOS omega FETs, **Technical Disgest of IEDM**, p. 255, 2002.
- [27] MYIANO, S.; HIROSE, M.; MASUOKA, F.; Numerical analysis of a cylindrical thin-pillar transistor (CYNTHIA), **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 39, n. 8, p. 1876-1881, 1992.

- [28] DOYLE, B. S.; DATTA, S.; DOCZY, M.; HARELAND, S. *et al.*; High performance fully-depleted tri-gate CMOS transistors, **IEEE Electron Device Letters**, v. 24, n. 4, p. 263-263, 2003.
- [29] CHAU, R.; DOYLE, B.; KAVALIEROS, J.; BARLAGE, D. *et al.*; Advanced depleted-substrate transistors: single-gate, double-gate and tri-gate, **Extended Abstracts of the SSDM**, p. 68, 2002.
- [30] COLINGE, J. P.; **FinFETs and Other Multi-Gate Transistors**, New York, Springer, 1ª edição, 339p., 2008.
- [31] LANDGRAF, E.; RÖSNER, W.; STÄDELE, M.; DREESJORNFELD, L. *et al.*; Influence of crystal orientation and body doping on trigate transistor performance, **Solid-State Electronics**, v. 50, n. 1, p. 38-43, 2006.
- [32] COLINGE, J. P.; Multiple-gate SOI MOSFETs, **Solid-State Electronics**, v. 48, n. 6, p. 897-905, 2004.
- [33] COLINGE, J. P.; Novel gate concepts for MOS devices, **Proceedings of ESSDERC**, p. 45-49, 2004.
- [34] XIONG, W.; PARK, J. W.; COLINGE, J. P. Corner effect in multiple-gate SOI MOSFETs, Em: **SOI Conference IEEE International**, p. 111-113, 2003.
- [35] FOSSUM, J. G.; YANG, J. W.; TRIVEDI, V. P.; Suppression of the corner effects in triple-gate MOSFETs, **IEEE Electron Device Letters**, v. 24, n. 12, p. 745-747, 2003.
- [36] BALESTRA, F.; CRISTOLOVEANU, S.; BENACHIR, M.; BRINI, J. *et al.*; Double-gate silicon-on-insulator transistor with volume inversion: A new device with greatly enhanced performance, **IEEE Electron Device Letters**, v. 8, n. 9, p. 410-412, 1987.

- [37] OUISSE, T.; Self-consistent quantum-mechanical calculations in ultrathin silicon-on-insulator structures, **Journal of Applied Physics**, Part 1, v. 76, n. 10, p. 5989-5995, 1994.
- [38] COLINGE, J. P.; COLINGE, C. A.; **Physics of Semiconductor Devices**, 1st Ed., Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 436p., 2002.
- [39] WONG, H.-S.; WHITE, M. H.; KRUTSICK, T. J.; BOOTH, R. V.; Modeling of transconductance degradation and extraction of threshold voltage in thin oxide MOSFET's, **Solid-State Electronics**, v. 30, n. 9, p. 953-968, 1987.
- [40] GARCÍA SÁNCHEZ, F. J.; ORTIZ-CONDE, A.; MUCI, J.; Understanding threshold voltage in undoped-body MOSFETs: An appraisal of various criteria, **Microelectronics Reliability**, v. 46, n. 5/6, p. 731-742, 2006.
- [41] CUNHA, A. I. A.; SCHNEIDER, M. C. ; MONTORO, C. G. ; CAETANO, C. D. C. *et al.*; Extraction of MOSFET effective channel length and width based on the transconductance-to-current ratio, Em: **NSTI Nanotech 2005 – Workshop on Compact Modeling**, Anaheim, Proceedings of Nanotech 2005, p. 139-141, 2005.
- [42] PAO, H. C.; SAH, C. T.; Effects of diffusion current on characteristics of metal-oxide(insulator)-semiconductor transistors, **Solid-State Electronics**, v. 9, n. 10, p. 927-937, 1966.
- [43] TAUR, Y.; LIANG, X.; WANG, W.; LU, H.; A continuous, analytical drain-current model for DG MOSFETs, **IEEE Electron Device Letters**, v. 25, n. 2, p. 107-109, 2004.
- [44] AKARVARDAR, K.; MERCHA, A.; CRISTOLOVEANU, S.; GENTIL, P. *et al.*, A Two-Dimensional Model for Interface Coupling in Triple-Gate Transistors, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 54, n. 4, p.767-775, 2007.

- [45] CUNHA, A. I. A.; PAVANELLO, M. A.; DORIA, R. T.; MONTORO, C. G. *et al.*; Direct determination of threshold condition in DG-MOSFETs from the g_m/I_D curve, Em fase de análise no **Solid-State Electronics**.
- [46] SILVEIRA, F.; FLANDRE, D.; JESPERS, P. G. A.; A g_m/I_D based methodology for the design of CMOS analog circuits and its application to the synthesis of a silicon-on-insulator micropower OTA, **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 31, no. 9, p. 1314-1319, 1996.
- [47] COLINGE, J. P.; Quantum-wire effects in trigate SOI MOSFETs, **Solid-State Electronics**, v. 51, n. 9, p. 1153-1160, 2007.
- [48] POIROUX, T.; VINET, M.; FAYNOT, O.; WIDIEZ, J. *et al.*; Multiple gate devices: advantages and challenges, **Microelectronic Engineering**, v. 80, p. 378, 2005.
- [49] SELBERHERR, S.; MOS Device Modeling at 77 K, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 36, n. 8, p. 1464-1474, 1989.
- [50] McKELVEY, J. P.; **Solid State and Semiconductor Physics**, Krieger Pub Co, 512p., 1982.
- [51] SAH, C. T.; CHAN, P. C. H.; WANG, C. K.; YAMAKAWA, K. A. *et al.*; Effect of zinc impurity in silicon solar-cell efficiency, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 28, n. 3, p. 304-313, 1981.
- [52] CAUGHEY, D.; THOMAS, R. E.; Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field, **Proceedings of the IEEE**, v. 55, n. 12, p. 2192-2193, 1967.
- [53] DORKEL, J. M.; LETURCQ, Ph.; Carrier mobilities in silicon semi-empirically related to temperature, Doping and Injection Level, **Solid-State Electronics**, v. 24, n. 9, p. 821-825, 1981.

- [54] LI, S. S.; THURBER, W. R.; The dopant density and temperature dependence of electron mobility and resistivity in n-type silicon, **Solid-State Electronics**, v. 20, n. 7, p. 609-616, 1977.
- [55] SOUZA, M.; **Modelagem, simulação e fabricação de circuitos analógicos com transistores SOI convencionais e de canal gradual operando em temperaturas criogênicas**, 2008. 197p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [56] VEERARACHAVAN, S.; FOSSUM, J. G.; A physical short-channel model for the thin-film SOI MOSFET applicable to device and circuit CAD, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 35, n. 11, p. 1866-1875, 1988.
- [57] BREWS, J. R.; Subthreshold behavior of uniformly and nonuniformly doped long-channel MOSFET, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 26, n. 9, p. 1282-1291, 1979.
- [58] VEERARACHAVAN, S.; FOSSUM, J. G.; Short-channel effects in SOI MOSFETs, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 36, n. 3, p. 522-528, 1989.
- [59] WOO, J. C. S.; PLUMMER, J. D.; Short-channel effects in MOSFETs at liquid-nitrogen temperature, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 33, n. 7, p. 1012-1019, 1986.
- [60] OHRING, M.; **Materials science of thin films deposition and structure**, 2nd Ed., San Diego, CA: Academic Press, 794p., 2002.
- [61] FRANSSILA, S.; **Introduction to microfabrication**, Chichester: John Wiley, 432p., 2004.

- [62] AUGENDRE, E. et al; On the scalability of source/drain current enhancement in thin film sSOI; **Proceedings of ESSDERC**, p. 301-304, 2005.
- [63] LIU, C. W.; MAIKOP, S.; YU, C. Y.; Mobility-enhancement technologies, **IEEE Circuits and Devices Magazine**, v. 21, n. 3, p. 21-36, 2005.
- [64] JAIN, S. C.; MAES, H. E.; PINARDI, K.; WOLF, I. De.; Stresses and strains in lattice-mismatched stripes, quantum wires, quantum dots, and substrates in Si technology, **Journal of Applied Physics**, v. 79, n. 11 , p. 8145-8165, 1996.
- [65] DISMUKES, J. P.; EKSTROM, L.; PAFF, R. J.; Lattice parameter and density in germanium-silicon alloys, **The Journal of Physical Chemistry**, v. 68, n. 10 , p. 3021-3027, 1964.
- [66] CHO, C.-H.; Characterization of Young's modulus of silicon versus temperature using a "beam deflection" method with a four-point bending fixture, **Current Applied Physics**, v. 9, n. 2, p. 538-545, 2009.
- [67] RADU, I.; HIMCINSCHI, C.; SINGH, R.; REICHE, M. *et al.*, sSOI fabrication by wafer bonding and layer splitting of thin SiGe virtual substrates, **Materials Science and Engineering: B**, v. 135, n. 3, p. 231-234, 2006.
- [68] RICHTER, J.; HANSEN, O.; NYLANDSTED LARSEN, A.; LUNDSGAARD HANSEN, J. *et al.*; Piezoresistance of silicon and strained Si_{0.9}Ge_{0.1}, **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 123-124, p. 388-396, 2005.
- [69] HEARN, E. J.; **Mechanics of materials 1: an introduction to the mechanics of elastic and plastic deformation of solids and structural components**, Butterworth-Heinemann, 456p., 1997.

- [70] OLBRECHTS, B.; RUE, B.; SUSKI, J.; FLANDRE, D.; RASKIN, J. P.; Characterization of FD SOI devices and VCO's on thin dielectric membranes under pressure, **Solid State Electronics**, v. 51, n. 9, p. 1229-1237, 2007.
- [71] NYE, J. F.; **Physical properties of crystals**, Oxford: Clarendon Press, 352p., 1985.
- [72] BIR, G. L.; PIKUS, G. E.; **Symmetry and strain-induced effects in semiconductors**, New York: John Wiley & Sons, 484p., 1974.
- [73] PAVANELLO, M. A.; MARTINO, J. A.; SIMOEN, E.; ROOYACKERS, R. *et al.*; Analog performance of standard and strained triple-gate silicon-on-insulator nFinFETs, **Solid State Electronics**, v. 52, n. 12, p. 1904-1909, 2008.
- [74] ANDRIEU, F.; DUPRÉ, C.; ROCHETTE, F.; FAYNOT, O. *et al.*; 25nm Short and narrow strained FDSOI with TiN/HfO₂ gate stack, **Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers**, p. 134-135, 2006.
- [75] FISCHETTI, M. V.; LAUX, S. E.; Band structure, deformation potentials, and carrier mobility in strained Si, Ge, and SiGe alloys, **Journal of Applied Physics**, v. 80, n. 4, p. 2234-2252, 1996.
- [76] CHAN, V.; RIM, K.; LEONG, M.; YANG, S. *et al.*; Strain for CMOS performance improvement, **IEEE 2005 Custom Integrated Circuits Conference**, p. 667-674, 2005.
- [77] MOHTA, N.; THOMPSON, S. E.; Mobility enhancement, **IEEE Circuits and Devices Magazine**, v. 21, n. 5, p. 18-23, 2005.
- [78] CLAEYS, C.; SIMOEN, E.; PUT, S.; GIUSI, G. *et al.*; Impact strain engineering on gate stack quality and reliability, **Solid State Electronics**, v. 52, n. 8, p. 1115-1126, 2008.

- [79] THOMPSON, S.E.; SUN, G.; WU, K.; LIM, J. *et al.*; Key differences for process-induced uniaxial vs. substrate-induced biaxial stressed Si and Ge channel MOSFETs; **IEDM Technical Digest**, p. 221-224, 2004.
- [80] THOMPSON, S. E.; SUN, G.; CHOI, Y. S.; NISHIDA, T.; Uniaxial-process-induced strained-Si: extending the CMOS roadmap, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 53, n. 5, p. 1010-1020, 2006.
- [81] EGGLEY, J. L.; CHIDAMBARRAO, D.; Strain effects on device characteristics: Implementation in drift-diffusion simulators, **Solid State Electronics**, v.36, n. 12, p. 1653-1664, 1993.
- [82] BARDEEN, J.; SHOCKLEY, W.; Deformation potentials and mobilities in non-planar crystals, **Physical Review**, v. 80, n. 1, p. 72-80, 1950.
- [83] GOROFF, I.; KLEINMAN, L.; Deformation potentials in silicon. III. Effects of a general strain on conduction and valence levels, **Physical Review**, v. 132, n. 3, p. 1080-1084, 1963.
- [84] UNGERSBOECK, E.; DHAR, S.; KARLOWATZ, G.; SVERDLOV, V. *et. al.*; The effects of general strain on the band structure and electron mobility of silicon, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 54, n. 9, p. 2183-2190, 2007.
- [85] DHAR, S.; KOSINA, H.; PALANKOVSKI, V.; UNGERSBOECK, S. E.; Electron mobility model for strained-Si devices, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 52, n. 4, p. 527-533, 2005.
- [86] DEVEDIT User's Manual, SILVACO (2006).
- [87] DECKBUILD User's Manual, SILVACO (2007).

- [88] Sentaurus Structure Editor, SYNOPSIS (2009).
- [89] KLAASSEN, D. B. M.; A unified model for device simulation-I. Model equations and concentration dependence, **Solid-State Electronics**, v. 35, n. 7, p. 953-959, 1992.
- [90] CONDE, J. E.; CERDEIRA, A.; PAVANELLO, M. A.; 3D Triple-gate simulation considering the crystallographic orientations, Em: **SBMicro 2008 – 23rd International Symposium on Microelectronics Technology and Devices**, p. 197-201 , Gramado, 2008.
- [91] DORIA, R. T.; PAVANELLO, M. A.; Low Temperature and Silicon Thickness Influences on the Threshold Voltage of Double-Gate MOSFETs Considering a Charge Based Extraction Procedure, Em: **SBMicro 2009 – 24th International Symposium on Microelectronics Technology and Devices**, p. 605-612, Natal, 2009.
- [92] CERDEIRA, A.; MOLDOVAN, O.; IÑIGUEZ, B.; ESTRADA, M.; Modeling of potentials and threshold voltage for symmetric doped double-gate MOSFETs, **Solid-State Electronics**, v. 52, n. 5, p. 830-837, 2008.
- [93] JIN, Y.; ZENG, C.; MA, L.; BARLAGE, D.; Analytical threshold voltage model with TCAD simulation verification for design and evaluation of tri-gate MOSFETs, **Solid-State Electronics**, v. 51, n. 7, p. 347-353, 2007.
- [94] COLLAERT, N.; DEMAND, M.. FERAIN, I.; LISONI, J. *et al.*; Tall triple-gate devices with TiN/HfO₂ gate stack, **Symposium on VLSI technology digest of technical papers**, p. 108-109, 2005.
- [95] SANTOS, S. D.; MARTINO, J. A.; SIMOEN, E.; CLAEYS, C.; DIBL study using triple gate unstrained and uniaxial/biaxial strained FinFETs, Em: **SBMicro 2009 – 24th International Symposium on Microelectronics Technology and Devices**, p. 591-596, Natal, 2009.

- [96] HAKIM, M. M. A.; HAQUE, A.; Accurate modeling of gate capacitance in deep submicron MOSFETs with high-K gate-dielectrics, **Solid-State Electronics**, v. 48, n. 7, p. 1095-1100, 2004.
- [97] ORIGIN 7.0 SR4 User's Manual, ORIGINLAB (2002).
- [98] NEWNHAN, R. E.; **Properties of Materials: Anisotropy, Symmetry, Structure**, Oxford University Press, 378p., 2005.
- [99] DORIA, R. T., PAVANELLO, M. A.; Threshold voltage dependence on the temperature in strained and standard nFinFETs, A ser publicado na EuroSOI 2010, Grenoble, 2010.
- [100] SOUZA, M.; MARTINO, J. A.; SIMOEN, E.; CLAEYS, C., PAVANELLO, M. A.; Analog operation of uniaxially and biaxially strained FD SOI nMOSFETs at cryogenics temperatures, Em: **EuroSOI 2008 – Fourth Workshop of the Thematic Network on Silicon-on-Insulator Technology, Devices and Circuits**, p. 77-78, Cork, 2008.
- [101] KANDA, Y.; A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 29, n. 1, p. 64-70, 1982.

APÊNDICE A

Abaixo segue o arquivo de simulação do Deckbuild, contendo tanto a programação Devedit como Atlas, do dispositivo FinFET de $W_{\text{Fin}} = 20$ nm em 100 K:

```

go devedit simflags="-3d"
DevEdit version=2.8.5.R

work.area x1=-0.012 y1=-0.13 x2=0.012 y2=0.032

#óxido de porta
region reg=1 mat="Silicon Oxide" z1=-0.605 z2=0.605 \
  polygon="-0.012,0.03 -0.01,0.03 -0.01,-0.03 0.01,-0.03 0.01,0.03
0.012,0.03 0.012,-0.032 -0.012,-0.032"

#corpo central
region reg=2 name=body1 mat=Silicon z1=-0.605 z2=0.605 \
  polygon="0,-0.02 0.01,-0.03 -0.01,-0.03"
#
#corpo esquerdo
region reg=3 name=body2 mat=Silicon z1=-0.605 z2=0.605 \
  polygon="0,0.03 0,-0.02 -0.01,-0.03 -0.01,0.03"
#
#corpo direito
region reg=4 name=body3 mat=Silicon z1=-0.605 z2=0.605 \
  polygon="0,0.03 0,-0.02 0.01,-0.03 0.01,0.03"

#óxido enterrado
region reg=5 name=box mat="Silicon Oxide" z1=-0.605 z2=0.605 \
  polygon="-0.012,0.03 -0.012,0.13 0.012,0.13 0.012,0.03"

#####
#Grade
#####

bnd.cond when=never

constr.mesh id=1 mat.type=semiconductor max.height=0.01 max.width=0.004
min.height=0.009 min.width=0.0035
constr.mesh id=2 region.id=5 max.height=0.03 max.width=0.004 min.height=0.025
min.width=0.0035
constr.mesh id=3 x1=-0.01 y1=0.03 x2=-0.009 y2=-0.03 default
max.height=0.004 max.width=0.0005 min.height=0.0035 min.width=0.00045
constr.mesh id=4 x1=-0.009 y1=0.03 x2=-0.008 y2=-0.03 default
max.height=0.004 max.width=0.001 min.height=0.0035 min.width=0.0009
constr.mesh id=5 x1=0.008 y1=0.03 x2=0.009 y2=-0.03 default max.height=0.004
max.width=0.001 min.height=0.0035 min.width=0.0009
constr.mesh id=6 x1=0.009 y1=0.03 x2=0.01 y2=-0.03 default max.height=0.004
max.width=0.0005 min.height=0.0035 min.width=0.00045
constr.mesh id=7 x1=-0.009 y1=-0.028 x2=0.009 y2=-0.029 default
max.height=0.001 max.width=0.004 min.height=0.0009 min.width=0.0035

```

```

constr.mesh id=8 x1=-0.009 y1=-0.029 x2=0.009 y2=-0.03 default
max.height=0.0005 max.width=0.004 min.height=0.00045 min.width=0.0035
constr.mesh id=9 x1=-0.009 y1=0.03 x2=0.009 y2=0.029 default
max.height=0.001 max.width=0.005 min.height=0.0009 min.width=0.0045

constr.mesh id=10 x1=-0.01 y1=0.03 x2=-0.0098 y2=-0.03 default
max.height=0.004 max.width=0.0002 min.height=0.0035 min.width=0.00015
constr.mesh id=11 x1=0.01 y1=0.03 x2=0.0098 y2=-0.03 default
max.height=0.004 max.width=0.0002 min.height=0.0035 min.width=0.00015
constr.mesh id=12 x1=0.0098 y1=-0.0298 x2=-0.0098 y2=-0.03 default
max.height=0.0002 max.width=0.004 min.height=0.00015 min.width=0.0035

constr.mesh id=13 x1=-0.011 y1=-0.031 x2=0.011 y2=-0.03 default
max.height=0.001 max.width=0.004 min.height=0.0009 min.width=0.0035
constr.mesh id=14 x1=-0.011 y1=-0.03 x2=-0.01 y2=0.03 default
max.height=0.004 max.width=0.001 min.height=0.0035 min.width=0.0009
constr.mesh id=15 x1=0.011 y1=-0.03 x2=0.01 y2=0.03 default max.height=0.004
max.width=0.001 min.height=0.0035 min.width=0.0009
constr.mesh id=16 x1=-0.011 y1=0.031 x2=0.011 y2=0.03 default
max.height=0.001 max.width=0.004 min.height=0.0009 min.width=0.0035

constr.mesh id=17 x1=-0.01 y1=-0.028 x2=0.01 y2=-0.024 default
max.height=0.002 max.width=0.002 min.height=0.0015 min.width=0.0015
constr.mesh id=18 x1=-0.01 y1=-0.024 x2=0.01 y2=-0.018 default
max.height=0.003 max.width=0.003 min.height=0.0025 min.width=0.0025
constr.mesh id=19 x1=-0.01 y1=0.12 x2=0.01 y2=0.13 default max.height=0.01
min.height=0.009

Mesh Mode=MeshBuild

z.plane z= -0.605 spacing=0.1
z.plane z= -0.505 spacing=0.075
z.plane z= -0.465 spacing=0.01
z.plane z= -0.455 spacing=0.002
z.plane z= -0.4 spacing=0.01
z.plane z= -0.35 spacing=0.02
z.plane z= -0.2 spacing=0.075
z.plane z= 0.0000 spacing=0.1
z.plane z= 0.2 spacing=0.075
z.plane z= 0.35 spacing=0.02
z.plane z= 0.4 spacing=0.01
z.plane z= 0.455 spacing=0.002
z.plane z= 0.465 spacing=0.01
z.plane z= 0.505 spacing=0.075
z.plane z= 0.605 spacing=0.1

z.plane max.spacing=1000000 max.ratio=2

structure outf=Wfin20L910_estrutura_T100.str

go atlas

#TITLE Finfet Intrinseco L=910 nm - T=100 K
#*****
# Simulacao do Finfet
# L=910 nm Wfin=20 nm Hfin=60 nm
# Canal intrinseco Na=1E15 cm-3
# Temperatura = 100 K

```

```

# toxf=2.0 nm toxb=100 nm
#*****

electrode name=gate x.min=-0.012 x.max=0.012 y.min=-0.032 y.max=-0.032
z.min=-0.455 z.max=0.455
electrode name=gate2 x.min=-0.012 x.max=-0.012 y.min=-0.032 y.max=0.03
z.min=-0.455 z.max=0.455
electrode name=gate3 x.min=0.012 x.max=0.012 y.min=-0.032 y.max=0.03 z.min=-
0.455 z.max=0.455
electrode name=source z.max=-0.555 y.max=-0.03 x.min=-0.01 x.max=0.01
electrode name=drain z.min=0.555 y.max=-0.03 x.min=-0.01 x.max=0.01
electrode name=substrate bottom

doping uniform conc=1e15 boron reg=2 x.min=-0.012 x.max=0.012 y.min=-0.03
y.max=0.03 z.min=-0.605 z.max=0.605
doping uniform conc=1e15 boron reg=3 x.min=-0.012 x.max=0.012 y.min=-0.03
y.max=0.03 z.min=-0.605 z.max=0.605
doping uniform conc=1e15 boron reg=4 x.min=-0.012 x.max=0.012 y.min=-0.03
y.max=0.03 z.min=-0.605 z.max=0.605

doping gaussian n.type conc=1e19 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=2 z.r=-0.455
x.min=-0.01 x.max=0.01 y.min=-0.03 y.max=0.03
doping gaussian n.type conc=1e19 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=2 z.l=0.455
x.min=-0.01 x.max=0.01 y.min=-0.03 y.max=0.03

doping gaussian n.type conc=1e19 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=3 z.r=-0.455
x.min=-0.01 x.max=0 y.min=-0.03 y.max=0.03
doping gaussian n.type conc=1e19 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=3 z.l=0.455
x.min=-0.01 x.max=0 y.min=-0.03 y.max=0.03

doping gaussian n.type conc=1e19 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=4 z.r=-0.455
x.min=0 x.max=0.01 y.min=-0.03 y.max=0.03
doping gaussian n.type conc=1e19 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=4 z.l=0.455
x.min=0 x.max=0.01 y.min=-0.03 y.max=0.03

doping gaussian n.type conc=5e20 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=2 z.r=-0.505
x.min=-0.01 x.max=0.01 y.min=-0.03 y.max=0.03
doping gaussian n.type conc=5e20 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=2 z.l=0.505
x.min=-0.01 x.max=0.01 y.min=-0.03 y.max=0.03

doping gaussian n.type conc=5e20 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=3 z.r=-0.505
x.min=-0.01 x.max=0 y.min=-0.03 y.max=0.03
doping gaussian n.type conc=5e20 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=3 z.l=0.505
x.min=-0.01 x.max=0 y.min=-0.03 y.max=0.03

doping gaussian n.type conc=5e20 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=4 z.r=-0.505
x.min=0 x.max=0.01 y.min=-0.03 y.max=0.03
doping gaussian n.type conc=5e20 char=0.02 lat.char=0.00304 reg=4 z.l=0.505
x.min=0 x.max=0.01 y.min=-0.03 y.max=0.03

contact name=gate workfunc=4.7
contact name=gate2 workfunc=4.7 common=gate
contact name=gate3 workfunc=4.7 common=gate
contact name=substrate workfunc=4.95

save outf=fin90_Wfin20_T100.str

```



```
models fermi kla cvt srh auger bgn fldmob consrh print temp=100 incomplete
ioniz
mobility region=2 BN.CVT=4.7E7 CN.CVT=1.74E5 DELN.CVT=5.82E14 FELN.CVT=1.0E50
mobility region=3 BN.CVT=1E7 CN.CVT=1.28E5 DELN.CVT=3.5E14 FELN.CVT=0.2E50
mobility region=4 BN.CVT=1E7 CN.CVT=1.28E5 DELN.CVT=3.5E14 FELN.CVT=0.2E50
method newton autonr bicgst trap maxtrap=10
output minset
solve init

solve vdrain=1e-3
solve vdrain=5e-3

solve vdrain=0.01 vstep=0.02 vfinal=0.05 name=drain
solve outf=fin90_Wfin20_T100_1.sol

log outf=idvgfin90_Wfin20_T100.log master
solve vgate=0.0 vstep=0.01 vfinal=1.2 name=gate

quit
```

APÊNDICE B

Abaixo seguem os arquivos de simulação Sentaurus do dispositivo com $W_{\text{Fin}} = 20$ nm e em 100K:

Arquivo .scm

```
; Limpa
(sde:clear)

; dimensoes
(define Wfin      0.020)
(define Lfin      1.000)
(define Hfin      0.060)
(define Lfonte    0.150)
(define tox       0.002)
(define tbox      0.100)
(define Wbox      0.120)

; Nome
(define nome      "L1000-W20-H60_s_bi")

; Refino
(define refino_fonte 0.020)
(define refino_dop   1)

; Deformação - a1 - max direção da largura do fin      - a2 - min direção da largura do fin
(define a1         0.0084)
(define a2         -0.002)
; Deformação - a3 - max direção do comprimento do fin  - a4 - min direção do comprimento do fin
(define a3         0.0084)
(define a4         0.000)

; Variáveis usadas na função da deformação na direção da largura do fin
(define x0         0.050)
(define x_d        (- (/ Wfin 2) x0))
(define x_e        (- x0 (/ Wfin 2)))
(define dx         0.01)
; Variáveis usadas na função da deformação na direção do comprimento do fin
(define y0         0.170)
(define y_d        (- (+ (/ Lfin 2) Lfonte) y0))
(define y_f        (- y0 (+ (/ Lfin 2) Lfonte)))
(define dy         0.01)

; Definição refino
(sdcd:define-refinement-size "DefRef00" 0.098 0.060 0.004      0.090 0.0005 0.004 )
(sdcd:define-refinement-size "DefRef01" 0.098 0.060 0.0025   0.090 0.0005 0.0025 )
(sdcd:define-refinement-size "DefRef02" 0.098 0.060 0.001    0.090 0.0005 0.001 )
(sdcd:define-refinement-size "DefRef03" 0.098 0.060 0.0006   0.090 0.0005 0.0006 )
(sdcd:define-refinement-size "DefRef04" 0.098 0.060 0.0001   0.090 0.0005 0.0001 )

(sdcd:define-refinement-size "DefRef10" 0.0025 0.060 0.004    0.0025 0.0005 0.004 )
(sdcd:define-refinement-size "DefRef11" 0.0025 0.060 0.0025   0.0025 0.0005 0.0025 )
(sdcd:define-refinement-size "DefRef12" 0.0025 0.060 0.001    0.0025 0.0005 0.001 )
(sdcd:define-refinement-size "DefRef13" 0.0025 0.060 0.0006   0.0025 0.0005 0.0006 )
(sdcd:define-refinement-size "DefRef14" 0.0025 0.060 0.0001   0.0025 0.0005 0.0001 )

(sdcd:define-refinement-size "DefRef20" 0.001 0.060 0.004     0.001 0.0005 0.004 )
(sdcd:define-refinement-size "DefRef21" 0.001 0.060 0.0025   0.001 0.0005 0.0025 )
(sdcd:define-refinement-size "DefRef22" 0.001 0.060 0.001    0.001 0.0005 0.001 )
(sdcd:define-refinement-size "DefRef23" 0.001 0.060 0.0006   0.001 0.0005 0.0006 )
```

```

(sdedr:define-refinement-size "DefRef24" 0.001 0.060 0.0001 0.001 0.0005 0.0001 )

(sdedr:define-refinement-size "DefRef30" 0.0004 0.060 0.004 0.0004 0.0005 0.004 )
(sdedr:define-refinement-size "DefRef31" 0.0004 0.060 0.0025 0.0004 0.0005 0.0025 )
(sdedr:define-refinement-size "DefRef32" 0.0004 0.060 0.001 0.0004 0.0005 0.001 )
(sdedr:define-refinement-size "DefRef33" 0.0004 0.060 0.0006 0.0004 0.0005 0.0006 )
(sdedr:define-refinement-size "DefRef34" 0.0004 0.060 0.0001 0.0004 0.0005 0.0001 )

(sdedr:define-refinement-size "DefRef40" 0.0001 0.060 0.004 0.0001 0.0005 0.004 )
(sdedr:define-refinement-size "DefRef41" 0.0001 0.060 0.0025 0.0001 0.0005 0.0025 )
(sdedr:define-refinement-size "DefRef42" 0.0001 0.060 0.001 0.0001 0.0005 0.001 )
(sdedr:define-refinement-size "DefRef43" 0.0001 0.060 0.0006 0.0001 0.0005 0.0006 )
(sdedr:define-refinement-size "DefRef44" 0.0001 0.060 0.0001 0.0001 0.0005 0.0001 )

(sdedr:define-refinement-size "DefRef50" 0.110 0.080 0.005 0.100 0.075 0.005 )

(sdedr:define-refinement-size "DefRef60" 0.110 0.080 0.030 0.100 0.075 0.025 )
(sdedr:define-refinement-size "DefRef61" 0.110 0.080 0.002 0.100 0.075 0.002 )

(define dist1 0.0002)
(define dist2 0.002)
(define dist3 0.005)
(define dist4 0.010)

;Funcao Deformação
(define epsXX_d (string-append "(" (number->string a2) ") + (((" (number->string a1) ") - (" (number->string a2) ")) / (1 + (exp((x - (" (number->string x_d) ")) / (" (number->string dx) "))))))" ))

(define epsXX_e (string-append "(" (number->string a1) ") + (((" (number->string a2) ") - (" (number->string a1) ")) / (1 + (exp((x - (" (number->string x_e) ")) / (" (number->string dx) "))))))" ))

(define epsYY_f (string-append "(" (number->string a3) ") + (((" (number->string a4) ") - (" (number->string a3) ")) / (1 + (exp((y - (" (number->string y_f) ")) / (" (number->string dy) "))))))" ))

(define epsYY_d (string-append "(" (number->string a4) ") + (((" (number->string a3) ") - (" (number->string a4) ")) / (1 + (exp((y - (" (number->string y_d) ")) / (" (number->string dy) "))))))" ))

;Função Tensão Mecânica
(define funcaoXX_df (string-append "(10^10) * ((1.4031 * (" epsXX_d ")) + (0.38265 * (" epsYY_f ")))" ))
(define funcaoYY_df (string-append "(10^10) * ((0.38265 * (" epsXX_d ")) + (1.4031 * (" epsYY_f ")))" ))

(define funcaoXX_dd (string-append "(10^10) * ((1.4031 * (" epsXX_d ")) + (0.38265 * (" epsYY_d ")))" ))
(define funcaoYY_dd (string-append "(10^10) * ((0.38265 * (" epsXX_d ")) + (1.4031 * (" epsYY_d ")))" ))

(define funcaoXX_ef (string-append "(10^10) * ((1.4031 * (" epsXX_e ")) + (0.38265 * (" epsYY_f ")))" ))
(define funcaoYY_ef (string-append "(10^10) * ((0.38265 * (" epsXX_e ")) + (1.4031 * (" epsYY_f ")))" ))

(define funcaoXX_ed (string-append "(10^10) * ((1.4031 * (" epsXX_e ")) + (0.38265 * (" epsYY_d ")))" ))
(define funcaoYY_ed (string-append "(10^10) * ((0.38265 * (" epsXX_e ")) + (1.4031 * (" epsYY_d ")))" ))

; Regiões

; Define o canal 2D
(define r1 (sdegeo:create-cuboid
  (position (- (/ Wfin 2)) (- (+ (/ Lfin 2) Lfonte)) (- (/ Hfin 2)))
  (position 0 (+ (/ Lfin 2) Lfonte) (/ Hfin 2))
  "Silicon" "corpo1"
)
)

(define r2 (sdegeo:create-cuboid
  (position 0 (- (+ (/ Lfin 2) Lfonte)) (- (/ Hfin 2)))
  (position (/ Wfin 2) (+ (/ Lfin 2) Lfonte) (/ Hfin 2))
  "Silicon" "corpo2"
)
)

(sde:split-solid (find-body-id (position -0.001 0 0 )) (position (- (/ Wfin 2)) (- (+ (/ Lfin 2) Lfonte)) (/ Hfin 2))
  (gvector (/ 0.0001 (/ Wfin 2)) 0 (- (/ Hfin 2) 0.02)))
(sde:split-solid (find-body-id (position 0.001 0 0 )) (position (/ Wfin 2) (- (+ (/ Lfin 2) Lfonte)) (/ Hfin 2))
  (gvector (/ 0.0001 (/ Wfin 2)) 0 (- (/ Hfin 2) 0.02)))

```

```

(gvector (- (/ 0.0001 (/ Wfin 2))) 0 (- (/ Hfin 2) 0.02)))
(sdegeo:bool-unite (list
  (car (find-body-id (position -0.001 0.000 (- (/ Hfin 2) 0.001) )))
  (car (find-body-id (position 0.001 0.000 (- (/ Hfin 2) 0.001) )))
))

(sde:add-material (find-body-id (position 0.001 0 0)) "Silicon" "corpo_dir")
(sde:add-material (find-body-id (position -0.001 0 0)) "Silicon" "corpo_esq")
(sde:add-material (find-body-id (position 0 0 0.029)) "Silicon" "corpo_sup")

; Define o oxido de porta 2D
(define r3 (sdegeo:create-polygon (list
  (position (- (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2)) (- (/ Hfin 2)))
  (position (- (+ tox (/ Wfin 2))) (- (/ Lfin 2)) (- (/ Hfin 2)))
  (position (- (+ tox (/ Wfin 2))) (- (/ Lfin 2)) (+ tox (/ Hfin 2)))
  (position (+ tox (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2)) (+ tox (/ Hfin 2)))
  (position (+ tox (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2)) (- (/ Hfin 2)))
  (position (/ Wfin 2) (- (/ Lfin 2)) (- (/ Hfin 2)))
  (position (/ Wfin 2) (- (/ Lfin 2)) (/ Hfin 2))
  (position (- (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2)) (/ Hfin 2))
  (position (- (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2)) (- (/ Hfin 2)))
))
  "Oxide" "oxido"
))

; Alonga o oxido de porta no eixo z
(sdegeo:extrude (list (car (find-body-id (position (- (+ (/ Wfin 2) (/ tox 2))) (- (/ Lfin 2)) (- (/ Hfin 2))))) (- Lfin))

; Define o substrato 3D
(define r4 (sdegeo:create-cuboid
  (position (- (/ Wbox 2)) (- (+ (/ Lfin 2) Lfonte)) (- (/ Hfin 2)))
  (position (/ Wbox 2) (+ (/ Lfin 2) Lfonte) (- (+ (/ Hfin 2) tbox)))
  "Oxide" "box"
)

; Contatos
; Contato de porta
(sdegeo:define-contact-set "porta" 0.001 (color:rgb 1 0 0) "###")
(sdegeo:set-current-contact-set "porta")
(sdegeo:define-3d-contact (list (car (find-face-id (position (- (+ tox (/ Wfin 2))) 0.000 0.000 ))) "porta")
(sdegeo:define-3d-contact (list (car (find-face-id (position 0.000 (+ tox (/ Hfin 2)) ))) "porta")
(sdegeo:define-3d-contact (list (car (find-face-id (position (+ tox (/ Wfin 2)) 0.000 0.000 ))) "porta")

; Contato de dreno
(sdegeo:define-contact-set "dreno" 0.001 (color:rgb 1 0 0) "###")
(sdegeo:set-current-contact-set "dreno")
(sdegeo:define-3d-contact (list (car (find-face-id (position -0.001 (+ (/ Lfin 2) Lfonte) 0.000 ))) "dreno")
(sdegeo:define-3d-contact (list (car (find-face-id (position 0.001 (+ (/ Lfin 2) Lfonte) 0.000 ))) "dreno")
(sdegeo:define-3d-contact (list (car (find-face-id (position 0.000 (+ (/ Lfin 2) Lfonte) 0.029 ))) "dreno")

; Contato de fonte
(sdegeo:define-contact-set "fonte" -0.001 (color:rgb 1 0 0) "###")
(sdegeo:set-current-contact-set "fonte")
(sdegeo:define-3d-contact (list (car (find-face-id (position -0.001 (- (+ (/ Lfin 2) Lfonte) 0.000))) "fonte")
(sdegeo:define-3d-contact (list (car (find-face-id (position 0.001 (- (+ (/ Lfin 2) Lfonte) 0.000))) "fonte")
(sdegeo:define-3d-contact (list (car (find-face-id (position 0.000 (- (+ (/ Lfin 2) Lfonte) 0.029))) "fonte")

; Contato do substrato
(sdegeo:define-contact-set "substrato" -0.001 (color:rgb 1 0 0) "###")
(sdegeo:set-current-contact-set "substrato")

```

```

(sdegeo:define-3d-contact (list      (car (find-face-id (position 0.000 0.000 (- (+ (/ Hfin 2)
tbox) ) ) ) ) "substrato")

; Strain
(sdedr:define-refeval-window "dirF" "Cuboid" (position 0 (- (+ (/ Lfin 2) Lfonte)) (- (/
Hfin 2))) (position (/ Wfin 2) 0 (/ Hfin 2)) )
(sdedr:define-refeval-window "esqF" "Cuboid" (position 0 (- (+ (/ Lfin 2) Lfonte)) (- (/
Hfin 2))) (position (- (/ Wfin 2)) 0 (/ Hfin 2)) )
(sdedr:define-refeval-window "dirD" "Cuboid" (position 0 (+ (/ Lfin 2) Lfonte)) (- (/
Hfin 2))) (position (/ Wfin 2) 0 (/ Hfin 2)) )
(sdedr:define-refeval-window "esqD" "Cuboid" (position 0 (+ (/ Lfin 2) Lfonte)) (- (/
Hfin 2))) (position (- (/ Wfin 2)) 0 (/ Hfin 2)) )

(sdedr:define-analytical-profile "tensaoXX_dF" "StressXX" "a=1" funcaoXX_df 0.0 "general")
(sdedr:define-analytical-profile "tensaoXX_dD" "StressXX" "a=1" funcaoXX_dd 0.0 "general")
(sdedr:define-analytical-profile "tensaoXX_eF" "StressXX" "a=1" funcaoXX_ef 0.0 "general")
(sdedr:define-analytical-profile "tensaoXX_eD" "StressXX" "a=1" funcaoXX_ed 0.0 "general")

(sdedr:define-analytical-profile-placement "p_tensaoXX_dF" "tensaoXX_dF" "dirF" "Both" "Replace"
"Eval" "dirF" 0 "evalwin")
(sdedr:define-analytical-profile-placement "p_tensaoXX_dD" "tensaoXX_dD" "dirD" "Both" "Replace"
"Eval" "dirD" 0 "evalwin")
(sdedr:define-analytical-profile-placement "p_tensaoXX_eF" "tensaoXX_eF" "esqF" "Both" "Replace"
"Eval" "esqF" 0 "evalwin")
(sdedr:define-analytical-profile-placement "p_tensaoXX_eD" "tensaoXX_eD" "esqD" "Both" "Replace"
"Eval" "esqD" 0 "evalwin")

(sdedr:define-analytical-profile "tensaoYY_dF" "StressYY" "a=1" funcaoYY_df 0.0 "general")
(sdedr:define-analytical-profile "tensaoYY_dD" "StressYY" "a=1" funcaoYY_dd 0.0 "general")
(sdedr:define-analytical-profile "tensaoYY_eF" "StressYY" "a=1" funcaoYY_ef 0.0 "general")
(sdedr:define-analytical-profile "tensaoYY_eD" "StressYY" "a=1" funcaoYY_ed 0.0 "general")

(sdedr:define-analytical-profile-placement "p_tensaoYY_dF" "tensaoYY_dF" "dirF" "Both" "Replace"
"Eval" "dirF" 0 "evalwin")
(sdedr:define-analytical-profile-placement "p_tensaoYY_dD" "tensaoYY_dD" "dirD" "Both" "Replace"
"Eval" "dirD" 0 "evalwin")
(sdedr:define-analytical-profile-placement "p_tensaoYY_eF" "tensaoYY_eF" "esqF" "Both" "Replace"
"Eval" "esqF" 0 "evalwin")
(sdedr:define-analytical-profile-placement "p_tensaoYY_eD" "tensaoYY_eD" "esqD" "Both" "Replace"
"Eval" "esqD" 0 "evalwin")

; Concentração de dopantes
; Canal
(sdedr:define-constant-profile "definicao_perfil_constante_canal" "BoronActiveConcentration"
1e+15)
(sdedr:define-constant-profile-region "placement_perfil_constante_canal"
"definicao_perfil_constante_canal" "corpo_dir")
(sdedr:define-constant-profile-region "placement_perfil_constante_canal1"
"definicao_perfil_constante_canal" "corpo_esq")
(sdedr:define-constant-profile-region "placement_perfil_constante_canal2"
"definicao_perfil_constante_canal" "corpo_sup")

; Dreno
(sdedr:define-refeval-window "DopGaussDrenoJan" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2)) (- (+ (/ Lfin
2) Lfonte)) (- (/ Hfin 2))) (position (/ Wfin 2) (- (/ Lfin 2)) (/ Hfin 2)) )
(sdedr:define-gaussian-profile "DopGaussDrenoDef" "ArsenicActiveConcentration" "PeakPos" 0
"PeakVal" 5e20 "Length" 0.0015 "Gauss" "Length" 0)
(sdedr:define-analytical-profile-placement "DopGaussDreno" "DopGaussDrenoDef" "DopGaussDrenoJan"
"Both" "NoReplace" "Eval")

; Fonte
(sdedr:define-refeval-window "DopGaussFonteJan" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2)) (+ (/ Lfin 2)
Lfonte) (- (/ Hfin 2))) (position (/ Wfin 2) (/ Lfin 2) (/ Hfin 2)) )
(sdedr:define-gaussian-profile "DopGaussFonteDef" "ArsenicActiveConcentration" "PeakPos" 0
"PeakVal" 5e20 "Length" 0.0015 "Gauss" "Length" 0)
(sdedr:define-analytical-profile-placement "DopGaussFonte" "DopGaussFonteDef" "DopGaussFonteJan"
"Both" "NoReplace" "Eval")

; Grade
; Definição de janelas
;;Canal
(if (> (/ Wfin 2) dist4)

```



```

(sdedr:define-refeval-window "Refino23" "Cuboid" (position (- dist2 (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist3)) (position (- dist1 (/ Wfin 2)) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) dist2)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino24" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2) dist2) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist3)) (position (- (/ Wfin 2) dist1) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) dist2)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino25" "Cuboid" (position (- dist1 (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist3)) (position (- 0 (/ Wfin 2)) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) dist2)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino26" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2) dist1) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist3)) (position (- (/ Wfin 2) 0) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) dist2)) )

(sdedr:define-refeval-window "Refino30" "Cuboid" (position (- dist3 (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist2)) (position (- dist2 (/ Wfin 2)) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) dist1)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino31" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2) dist3) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist2)) (position (- (/ Wfin 2) dist2) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) dist1)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino32" "Cuboid" (position (- dist2 (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist2)) (position (- dist1 (/ Wfin 2)) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) dist1)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino33" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2) dist2) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist2)) (position (- (/ Wfin 2) dist1) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) dist1)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino34" "Cuboid" (position (- dist1 (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist2)) (position (- 0 (/ Wfin 2)) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) dist1)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino35" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2) dist1) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist2)) (position (- (/ Wfin 2) 0) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) dist1)) )

(sdedr:define-refeval-window "Refino39" "Cuboid" (position (- dist3 (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist1)) (position (- dist2 (/ Wfin 2)) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) 0)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino40" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2) dist3) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist1)) (position (- (/ Wfin 2) dist2) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) 0)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino41" "Cuboid" (position (- dist2 (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist1)) (position (- dist1 (/ Wfin 2)) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) 0)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino42" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2) dist2) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist1)) (position (- (/ Wfin 2) dist1) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) 0)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino43" "Cuboid" (position (- dist1 (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist1)) (position (- 0 (/ Wfin 2)) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) 0)) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino44" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2) dist1) (- (/ Lfin 2))
(- (/ Hfin 2) dist1)) (position (- (/ Wfin 2) 0) (/ Lfin 2) (- (/ Hfin 2) 0)) )

(sdedr:define-refeval-window "Refino48" "Cuboid" (position (- dist3 (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2))
(- dist3 (/ Hfin 2))) (position (- dist2 (/ Wfin 2)) (/ Lfin 2) (- 0 (/ Hfin 2))) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino49" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2) dist3) (- (/ Lfin 2))
(- dist3 (/ Hfin 2))) (position (- (/ Wfin 2) dist2) (/ Lfin 2) (- 0 (/ Hfin 2))) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino50" "Cuboid" (position (- dist2 (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2))
(- dist3 (/ Hfin 2))) (position (- (/ Wfin 2) dist1) (/ Lfin 2) (- 0 (/ Hfin 2))) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino51" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2) dist2) (- (/ Lfin 2))
(- dist3 (/ Hfin 2))) (position (- (/ Wfin 2) dist1) (/ Lfin 2) (- 0 (/ Hfin 2))) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino52" "Cuboid" (position (- dist1 (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2))
(- dist3 (/ Hfin 2))) (position (- 0 (/ Wfin 2)) (/ Lfin 2) (- 0 (/ Hfin 2))) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino53" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2) dist1) (- (/ Lfin 2))
(- dist3 (/ Hfin 2))) (position (- (/ Wfin 2) 0) (/ Lfin 2) (- 0 (/ Hfin 2))) )

;;Fonte
(sdedr:define-refeval-window "Refino100" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2)) (- (/ Lfin 2)) (-
(/ Hfin 2))) (position (/ Wfin 2) (- (+ (/ Lfin 2) refino_fonte)) (/ Hfin 2)) )
;;Dreno
(sdedr:define-refeval-window "Refino101" "Cuboid" (position (- (/ Wfin 2)) (/ Lfin 2) (-
(/ Hfin 2))) (position (/ Wfin 2) (+ (/ Lfin 2) refino_fonte) (/ Hfin 2)) )
;;BOX
(sdedr:define-refeval-window "Refino102" "Cuboid" (position (- (/ Wbox 2)) (- (+ (/ Lfin 2)
Lfonte)) (- (+ (/ Hfin 2) tbox))) (position (/ Wbox 2) (+ (/ Lfin 2) Lfonte) (- (/ Hfin 2))) )
(sdedr:define-refeval-window "Refino103" "Cuboid" (position (- (+ (/ Wfin 2) tox)) (- (+ (/
Lfin 2) refino_fonte)) (- (+ (/ Hfin 2) 0.004))) (position (+ (/ Wfin 2) tox) (+ (/ Lfin 2)
refino_fonte) (- (/ Hfin 2))) )

; Aplicação refino
(if (> (/ Wfin 2) dist4)
  (begin
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref0" "DefRef00" "Refino0" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref9" "DefRef01" "Refino9" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref18" "DefRef02" "Refino18" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref27" "DefRef03" "Refino27" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref36" "DefRef04" "Refino36" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref45" "DefRef02" "Refino45" ))

```

```

(if (> (/ Wfin 2) dist3)
  (begin
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref1" "DefRef10" "Refino1" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref2" "DefRef10" "Refino2" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref10" "DefRef11" "Refino10" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref11" "DefRef11" "Refino11" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref19" "DefRef12" "Refino19" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref20" "DefRef12" "Refino20" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref28" "DefRef13" "Refino28" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref29" "DefRef13" "Refino29" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref37" "DefRef14" "Refino37" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref38" "DefRef14" "Refino38" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref46" "DefRef12" "Refino46" )
    (sdedr:define-refinement-placement "Ref47" "DefRef12" "Refino47" )))

(sdedr:define-refinement-placement "Ref3" "DefRef20" "Refino3" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref4" "DefRef20" "Refino4" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref5" "DefRef30" "Refino5" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref6" "DefRef30" "Refino6" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref7" "DefRef40" "Refino7" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref8" "DefRef40" "Refino8" )

(sdedr:define-refinement-placement "Ref12" "DefRef21" "Refino12" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref13" "DefRef21" "Refino13" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref14" "DefRef31" "Refino14" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref15" "DefRef31" "Refino15" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref16" "DefRef41" "Refino16" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref17" "DefRef41" "Refino17" )

(sdedr:define-refinement-placement "Ref21" "DefRef22" "Refino21" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref22" "DefRef22" "Refino22" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref23" "DefRef32" "Refino23" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref24" "DefRef32" "Refino24" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref25" "DefRef42" "Refino25" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref26" "DefRef42" "Refino26" )

(sdedr:define-refinement-placement "Ref30" "DefRef23" "Refino30" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref31" "DefRef23" "Refino31" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref32" "DefRef33" "Refino32" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref33" "DefRef33" "Refino33" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref34" "DefRef43" "Refino34" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref35" "DefRef43" "Refino35" )

(sdedr:define-refinement-placement "Ref39" "DefRef24" "Refino39" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref40" "DefRef24" "Refino40" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref41" "DefRef34" "Refino41" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref42" "DefRef34" "Refino42" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref43" "DefRef44" "Refino43" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref44" "DefRef44" "Refino44" )

(sdedr:define-refinement-placement "Ref48" "DefRef22" "Refino48" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref49" "DefRef22" "Refino49" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref50" "DefRef32" "Refino50" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref51" "DefRef32" "Refino51" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref52" "DefRef42" "Refino52" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref53" "DefRef42" "Refino53" )

(sdedr:define-refinement-placement "Ref100" "DefRef50" "Refino100" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref101" "DefRef50" "Refino101" )

(sdedr:define-refinement-placement "Ref102" "DefRef60" "Refino102" )
(sdedr:define-refinement-placement "Ref103" "DefRef61" "Refino103" )

(sdedr:define-refinement-function "DefRef00" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef01" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef02" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef03" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )

```



```

(sdedr:define-refinement-function "DefRef04" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef10" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef11" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef12" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef13" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef14" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef20" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef21" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef22" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef23" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef24" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef30" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef31" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef32" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef33" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef34" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef40" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef41" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef42" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef43" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )
(sdedr:define-refinement-function "DefRef44" "ArsenicActiveConcentration" "MaxTransDiff"
refino_dop )

; Construção da grade

(sde:build-mesh "mesh" "-P -R -F tdr" nome)

```

Arquivo .cmd:

```

File { * input files:
  Grid = "L1-W20-H60_15G_msh.tdr"
  Doping = "L1-W20-H60_15G_msh.tdr"
  Piezo = "L1-W20-H60_15G_msh.tdr"
  Parameter = "Param_2.par"
  * output files:
  Plot = "1-20-60_IdVg_T300_15G_des.tdr"
  Current = "1-20-60_IdVg_T300_15G_des.plt"
  Output = "1-20-60_IdVg_T300_15G_des.log"}

Electrode {
  { Name="fonte" Voltage= 0.000 }
  { Name="dreno" Voltage= 0.050 }
  { Name="porta" Voltage= 0.000 Workfunction=4.7 }
  { Name="substrato" Voltage= 0.000 Workfunction=4.95}
}

Physics {

```

```

Temperature=300
Mobility (
    Enormal
    PhuMob
    HighFieldSaturation
    IncompleteIonization
)
IncompleteIonization
Recombination( SRH(DopingDep TempDependence)
)
EffectiveIntrinsicDensity (BandGapNarrowing (OldSlotboom))
}

Physics (Material="Silicon") {
    Piezo(
        OriKddX = (1,1,0)
        OriKddY = (-1,1,0)
        Model(DOS          (eMass          hMass)          DeformationPotential
        Mobility(eSubband(Doping Scattering)))
    )
}

Plot {
    eDensity hDensity eCurrent hCurrent
    equasiFermi hquasiFermi
    eTemperature
    ElectricField eEparallel hEparallel
    Potential SpaceCharge
    SRHRecombination Auger
    eMobility hMobility eVelocity hVelocity
    Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
    ElectricField
    BandGap BandGapNarrowing Affinity ConductionBand valenceBand
}

Math {
    TensorGridAniso
    Extrapolate
    RelErrControl
    ExitOnFailure
}

Math {
    Method = pardiso
    number_of_threads = 2
    stacksize = 1000000
}

Solve {
    Poisson
    Coupled { Poisson Electron Hole }

    # Rampa:
    Quasistationary
    ( InitialStep=0.0083333333 Maxstep=0.0083333333
    Goal { name="porta" voltage=1.200 } )
    { Coupled { Poisson Electron Hole } }
}

```

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)