



Análise da densidade de carga de inversão em função da temperatura em UTBB SOI MOSFETs

Natasha Merzbahcer¹, Arianne Pereira¹, Renato Giacomini¹

¹Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brasil
nacrismerzbahcer@fei.edu.br

Resumo— Neste trabalho, é realizado um estudo sobre a densidade de carga de inversão (Q_{TH}) na condição de limiar para temperaturas na faixa de 300 a 425K. O estudo é baseado na comparação de valores extraídos de simulações numéricas com modelos analíticos já existentes de forma a encontrar o modelo mais preciso e simples possível. Dentre os três modelos analisados, verificou-se que o modelo de Rudenko e o de Fasarakis são os que mais se aproximam da referência para calcular a densidade de carga de inversão.

I. INTRODUÇÃO

A tecnologia silício sobre isolante (*Silicon On Insulator* - SOI) é uma alternativa ao MOSFET *Bulk* para responder à demanda na redução de dimensões dos dispositivos, além de sua vantagem em relação à imunidade à radiação. O óxido enterrado traz um melhor controle eletrostático e uma boa integração entre circuitos.

O (*Ultra Thin Body and Buried Oxide* - UTBB SOI MOSFET) com corpo e óxido enterrado ultrafino possui uma camada ultrafina de silício posicionada sobre uma camada ultrafina de óxido enterrado e foi muito considerado para futuros nós tecnológicos, devido ao seu controle eletrostático aprimorado, alta imunidade a variação de dopagem e múltiplas tensões de limiar alcançadas por diferentes polarizações da segunda porta e do plano de terra [1, 2]. Sabe-se que a redução da espessura do filme de silício (t_{Si}) e da espessura do óxido enterrado (t_{BOX}) pode ajudar significativamente a reduzir o tamanho do dispositivo. Sem o dimensionamento do BOX, é necessário um filme SOI de 3 nm para o nó de 8 nm, enquanto pode ser mantido em torno de 5 nm, se a BOX for reduzida abaixo de 10 nm [1]. Normalmente, os dispositivos UTBB têm dimensões t_{BOX} entre 10 e 30 nm e t_{Si} em torno de 7-10 nm [3].

Em [4] para um transistor de efeito de campo de porta isolada (*Insulated Gate Field Effect Transistor* - IGFET), o comportamento da densidade de carga de inversão (Q_{TH}) é analisado de acordo com a inversão forte usando métodos de integração numérica na equação de Poisson. Em [5], os autores desenvolveram uma expressão analítica para a função de distribuição de carga de inversão, usando uma abordagem variacional para resolver a equação de Poisson - Schrodinger em função da espessura do silício e da

densidade de elétrons, considerando os Efeitos Quânticos nos MOSFETs de porta tropla (*Tri-Gate*). Em [6], é feita uma análise experimental do efeito de canal curto DIBL (*Drain Induced Barrier Lowering*) em função da temperatura em UTBBs e a extração de Q_{TH} é necessária para melhorar os resultados do modelo.

Nesse contexto, um estudo do comportamento de Q_{TH} em função da temperatura e seus aspectos físicos em UTBBs totalmente depletados (*Fully Depleted*) não foi investigado até o momento. O foco deste trabalho é analisar o modelo de Q_{TH} que mais se aproxima dos valores de referência em função da temperatura (T) na condição de limiar ($V_{GS}=V_{TH}$). Este trabalho faz uma análise comparativa da densidade de carga de inversão, que é proporcional ao número de portadores por centímetro quadrado presente no canal no momento da inversão.

II. METODOLOGIA

Nesta seção serão abordados tópicos importantes para este estudo, como as simulações numéricas e a extração dos parâmetros fundamentais para as análises comparativas do trabalho.

A. Simulações Numéricas Bidimensionais

Uma seção transversal da estrutura do UTBB SOI MOSFET é mostrada na Fig. 1, onde t_{ox} é a espessura do óxido de porta, t_{Si} é a espessura do filme de silício e t_{BOX} é a espessura de óxido enterrado, V_{GS} é a tensão de porta e V_{GB} é a tensão no substrato.

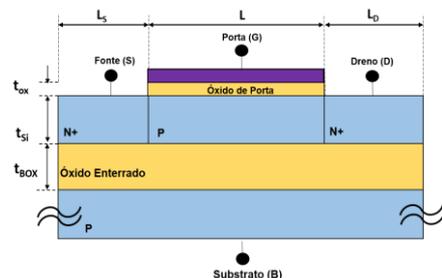


Fig. 1. Estrutura UTBB SOI MOSFET

Simulações numéricas de dispositivos foram realizadas usando o simulador ATLAS Silvaco [7]. Os dispositivos simulados têm as características do nó de 28 nm da ST Microelectronics [8], como segue: comprimento do canal

(L) de 500 nm, $t_{Si} = 7$ nm, $t_{ox} = 1,3$ nm, $t_{BOX} = 25$ nm, concentração de dopantes do canal (N_A) de 10^{15} cm⁻³ e concentração de dopantes na fonte e no dreno (N_D) de 10^{20} cm⁻³. Foram realizadas simulações com variação de temperatura entre 300 e 425 K, incluindo os modelos físicos de Klassen e Shirahata para mobilidade, SRH (*Shockley-Read-Hall*) para recombinação de portadores, BGN para estreitamento de bandgap e QUANTUM para efeitos quânticos. Todos os modelos físicos foram usados com os parâmetros padrão (*default*), conforme implementado no simulador de dispositivo ATLAS. As simulações foram realizadas para uma polarização de baixo dreno ($V_{DS}=50$ mV), $V_{GB}=0$ V e V_{GS} variando de 0 até 1 V. Os arquivos de estrutura foram salvos na condição de limiar ($V_{GS}=V_{TH}$).

B. Extração de parâmetros

A Fig. 2 mostra as curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ que foram obtidas para extrair a tensão de limiar, através do método ($1/2 gm/I_{DS}$) [9].

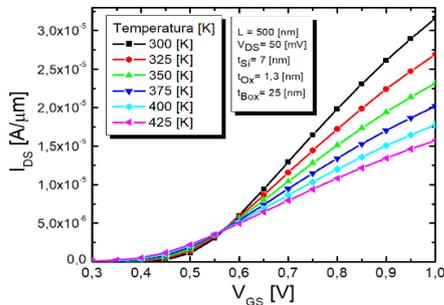


Fig. 2. Corrente de dreno em função da tensão de porta para diferentes temperaturas

As curvas exibem este perfil com a variação de temperatura pois a corrente depende diretamente de V_{TH} , a qual depende inversamente do potencial de fermi, ou seja, com o aumento da temperatura, o potencial de fermi é reduzido, causando assim uma diminuição na tensão de limiar e consequentemente diminuindo a corrente.

As cargas de inversão na condição de limiar (Q_{TH}) são definidas como a quantidade de cargas que são necessárias no limiar da inversão para que o canal de inversão seja formado e assim conduza corrente elétrica entre os terminais de fonte e dreno. Para extrair somente as Q_{TH} dos arquivos de estrutura, extraiu-se a concentração de elétrons em cada temperatura e foi calculada uma integral de volume ao longo do canal, além de desconsiderar as cargas de depleção, como segue abaixo na Eq. 1 [10]:

$$Q_{Si} = Q_{Fix} + Q_{TH} \quad (1)$$

onde Q_{Si} é a densidade de carga total no canal, Q_{Fix} é a densidade de carga fixa, dada pela Eq. 2 [10]:

$$Q_{Fix} = -q \cdot N_A \cdot t_{Si} \quad (2)$$

sendo q a carga do elétron.

A posição vertical do canal de inversão, chamada de Y_{MEAN} foi obtida pelos mesmos arquivos de estrutura, extraindo a concentração de elétrons em diferentes posições ao longo da estrutura, sendo representada pelas linhas verticais da Fig. 3, na qual os campos em vermelho

são as regiões de fonte e dreno e em azul o canal, bem como a região em verde que mostra os níveis de concentração de elétrons no canal. Para a extração do potencial elétrico necessário em um dos modelos, foram feitos cortes horizontais na estrutura de maneira semelhante à concentração de elétrons.

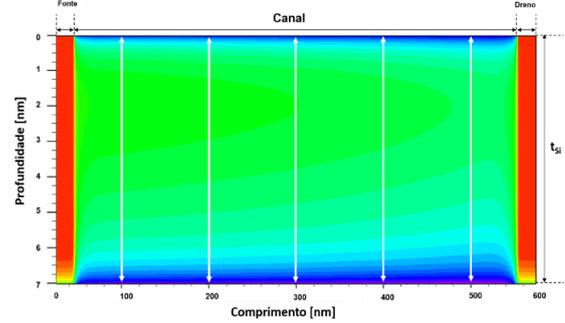


Fig. 3. Representação do canal para extração de Y_{MEAN}

Y_{MEAN} é definido matematicamente Segundo a Eq. (3), como mencionado anteriormente, ele foi extraído através da concentração de elétrons no centro do canal em relação à t_{Si} [11].

$$Y_{MEAN} = \frac{\int_0^{t_{Si}} (y \cdot eC) dy}{\int_0^{t_{Si}} (eC) dy} \quad (3)$$

onde y é a posição ao longo de t_{Si} e eC é a concentração de elétrons na condição de limiar.

A Fig. 4 mostra o gráfico do potencial elétrico em função do comprimento do canal para diferentes posições de Y ao longo de t_{Si} . Os valores obtidos destes gráficos e são usados para calcular a densidade de carga de inversão do modelo de Hiblot a ser mostrado logo adiante.

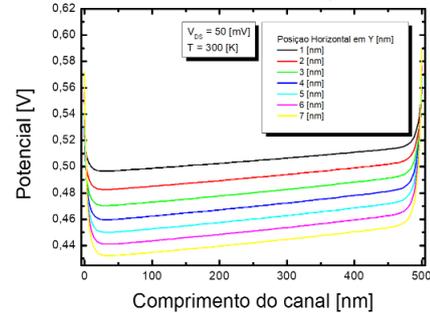


Fig. 4. Potencial elétrico em função do comprimento de canal para diferentes posições de Y .

C. O modelo de Fasarakis

O modelo de Fasarakis [11] é um modelo de tensão limiar (V_{TH}) que leva em consideração a densidade de carga de inversão (Q_{TH}) para definir a condição de limiar. Ele é representado pela Eq. 4 como segue:

$$V_{TH} = V_{FB} + A_f v_t \ln \left(\frac{Q_{TH} N_A}{n_i^2 t_{Si}} \right) - B_f \left[\phi_d - v_t \ln \left(\frac{Q_{TH} N_A}{n_i^2 t_{Si}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\phi_d + V_D - v_t \ln \left(\frac{Q_{TH} N_A}{n_i^2 t_{Si}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

onde V_{FB} é a tensão de faixa plana, v_t é o potencial térmico ($k \cdot T/q$), ϕ_d é o potencial interno da junção, n_i é a concentração intrínseca do silício, A_f e B_f são parâmetros dependentes das dimensões dos transistores. Este modelo adota em seus estudos o método da corrente constante para extração da tensão de limiar.

D. O modelo de Hiblot

O modelo de Hiblot [12] propõe uma equação para a capacitância de porta, levando em consideração os efeitos quânticos e segundo suas análises, adota que a condição de limiar é quando o potencial de superfície se torna igual ao dobro do potencial de Fermi ($\phi_s = 2\phi_f$), ele é definido matematicamente como segue a Eq. (5):

$$Q_{thH_t} := \left(\frac{q^2 \cdot m^*}{\pi \cdot h^2} \right) \left[\phi - \left(\frac{E_o}{q} \right) \right] \quad (5)$$

sendo ϕ o potencial elétrico em Y_{MEAN} , m^* um múltiplo da massa do elétron, h a constant de Planck, E_o é o primeiro nível da banda de energia, e é definido por:

$$E_o := q \cdot \left[\frac{[2 \cdot C_{ox} \cdot (v_g - \phi)]}{2 \cdot C_{si}} \right] \cdot \left(\frac{5}{4 \cdot \pi^2} + \frac{1}{6} \right) \quad (6)$$

onde C_{ox} é a capacitância do óxido, v_g é a tensão na porta e neste caso é igual à tensão de limiar, C_{si} é a capacitância do silício.

E. O modelo de Rudenko

O modelo de Rudenko [13] para Q_{TH} foi proposto para dispositivos UTB SOI, leva em consideração os efeitos quânticos e em seus estudos extrai a tensão de limiar através do método $\frac{1}{2} gm/I_{DS}$. Nele, o valor de Q_{TH} é calculado segundo a Eq (7):

$$Q_{TH(FDSOI)} = n \cdot \left[\frac{(k \cdot T)}{2 \cdot q} \cdot C_{OX} \right] \quad (7)$$

onde n é o fator de corpo. Os valores de n foram extraídos dos resultados da simulação, utilizando a razão máxima de gm/I_{DS} , onde gm é a transcondutância.

III. RESULTADOS

Os valores de Q_{TH} da Eq. 4 foram adaptados em [6], para descrever a dependência de V_{TH} com a temperatura. Na Fig. 5 são mostrados os valores de V_{TH} que foram substituídos na Eq. 4 para calcular o correspondente valor de Q_{TH} apresentado posteriormente. É possível notar que ao considerar os efeitos quânticos, V_{TH} é maior, devido ao fato de que esses efeitos elevam a tensão de porta necessária para aumentar a energia da banda de condução, ocasionando assim, um incremento em V_{TH} . Conforme aumenta-se a temperatura, a tensão de limiar diminui pelo fato dela ser inversamente proporcional ao potencial de Fermi, que aumenta com o aumento da temperatura.

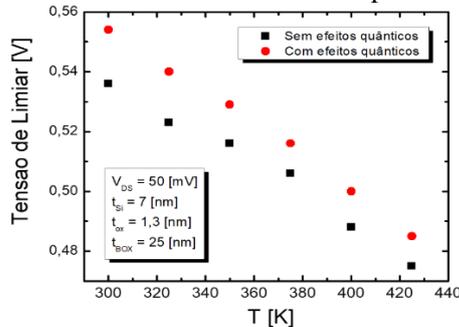


Fig. 5. Tensão de Limiar em função da temperatura comparando os efeitos quânticos

Os valores de Q_{TH} foram extraídos das simulações através dos arquivos de estrutura do dispositivo. A Fig. 6 mostra a densidade de carga de inversão em função da temperatura.

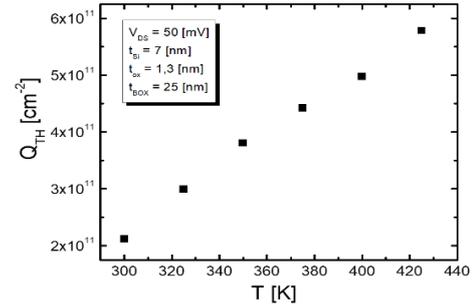


Fig. 6. Densidade de carga de inversão em função da temperatura

Pode-se notar que a densidade de cargas de inversão aumenta de acordo com o aumento da temperatura, isso se dá pelo fato dessas cargas dependerem da concentração de elétrons no canal, que conseqüentemente é proporcional ao aumento de temperatura devido a concentração intrínseca do material e da agitação das moléculas.

A Fig. 7 mostra os valores de Y_{MEAN} em função da temperatura para diferentes posições do canal.

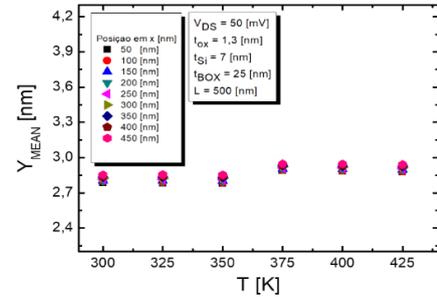


Fig. 7. Y_{MEAN} em função da temperatura para diferentes posições do canal

Pode-se notar que independente da temperatura e da posição em que se analisa o canal em relação ao comprimento, a posição da formação do canal de inversão se mantém praticamente o mesmo devido a ela ser apenas uma posição média que mostra onde está a maior concentração de elétrons no canal, sendo esta, uma forma de caracterizar a inversão de volume neste trabalho.

Na Fig. 8 são representados os potenciais elétricos em função da temperatura para diferentes posições de Y ao longo de t_{si} comparados aos potenciais de Fermi e de $2 \cdot \text{Fermi}$.

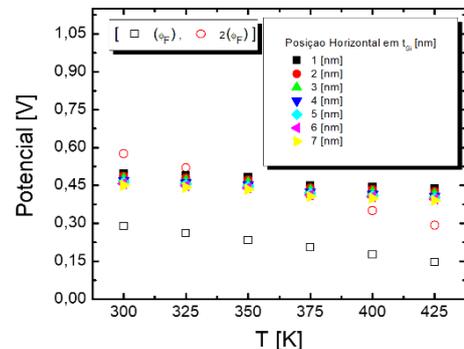


Fig. 8. Potencial em função da temperatura para diferentes posições de t_{si}

É possível perceber que o potencial se mantém praticamente o mesmo em relação à temperatura pois ele foi extraído em Y_{MEAN} , também nota-se que ele se aproxima do dobro do potencial de Fermi, ou seja, a primeira interface está realmente invertida e na condição de limiar. A Fig. 9 apresenta o fator de corpo em função da temperatura. Com o aumento da temperatura ocorre um aumento no fator de corpo, pois ele é, por definição, inversamente proporcional à inclinação de sublimiar, que por consequência é diretamente proporcional à temperatura.

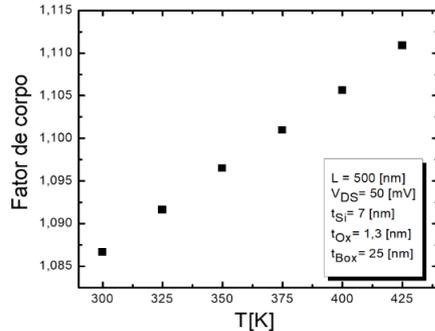


Fig. 9. Fator de corpo em função da temperatura

IV. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A Fig. 10 mostra os valores de Q_{TH} em função da temperatura e a comparação final entre os valores extraídos e calculados através dos modelos. Os valores extraídos das simulações foram utilizados como referência. Os modelos possuem diferentes tendências com o aumento da temperatura pois dependem de parâmetros que também possuem comportamento específico em relação à temperatura, sendo alguns deles mais fortemente dependentes dela. O modelo de Rudenko apresentou bons resultados em relação aos valores simulados, ele possui ordens de grandeza que se aproximam da referência, pois o método de extração da tensão de limiar usado por este modelo ser próximo ao utilizado neste trabalho, além de tendências que também se aproximam, mas em relação à temperatura possui um coeficiente angular diferente quando comparado à simulação. O modelo de Hiblot não se adequa para a análise em questão pois sua tendência é contrária aquela da referência. Já o modelo de Fasarakis tem a mesma tendência, com ordens de grandeza um pouco distantes da referência devido ao método de extração de V_{TH} deste modelo ser diferente do que é feito neste estudo, porém nota-se que a variação de carga em relação à temperatura (dQ_{TH}/dT) conforme ela é aumentada, mantém-se constante. Por tudo relacionado, pode-se perceber que os melhores modelos a serem adotados para o cálculo de Q_{TH} é o de Rudenko e o de Fasarakis, pois apresentam resultados bastante coerentes com a referência em relação à temperatura. A obtenção do valor de Q_{TH} em ambos os modelos é simples, sendo necessário apenas conhecer valores de tensão de limiar e fator de corpo.

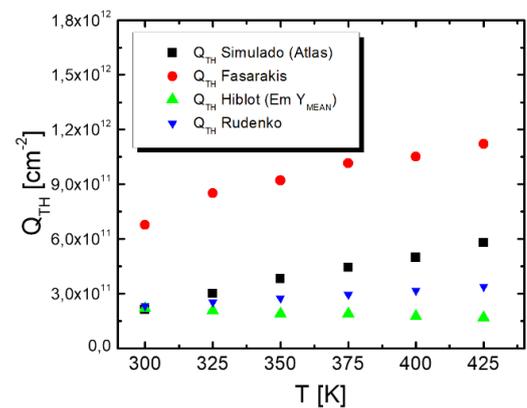


Fig. 10. Comparação de Q_{TH} em relação aos modelos

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Centro Universitário FEI, ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] FAYNOT, O. et al. "Planar Fully depleted SOI technology: A powerful architecture for the 20nm node and beyond". IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), pp 3.2.1-3.2.4, San Francisco 2010.
- [2] ANDRIEU, F. et al. "Fully depleted Silicon-On-Insulator with back bias and strain for low power and high performance applications". IEEE International Conference on IC Design and Technology (ICICDT), pp 59-62, Grenoble. 2010.
- [3] FENOUILLET-BERANGER, C. et al. FDSOI devices with thin BOX and ground plane integration for 32 nm node and below. Solid-State Electronics, St. Louis, Jul. 2009, vol. 53, pp. 730-734.
- [4] M. A. Karim et al. "Extraction of isothermal condition and thermal network in UTBB SOI MOSFETs", IEEE Electron Device Letters, 2012 vol. 33, pp.1306-1308.
- [5] LEWYN, L. L., MEINDL, J. D., "An IGFET Inversion Charge Model for VLSI Systems". IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 32, 1985.
- [6] PEREIRA, A. S. N., et al. An in-depth analysis of temperature effect on DIBL in UTBB FD SOI MOSFETs based on experimental data, numerical simulations and analytical models. Solid State Electronics, 2017, vol. 128, pp. 67-71.
- [7] ATLAS USER's Manual, Version 5.19.20 R, 2010.
- [8] Planes N, Weber O, Barral V, Haendler S, Noblet D, Croain D, et al. 28 nm FDSOI technology platform for high-speed low-voltage digital applications. In: Symposium on VLSI technology (VLSIT); 2012. p. 133-4.
- [9] CUNHA, Ana Isabela Araújo et al. Direct determination of threshold condition in DG-MOSFETs from the gm/ID curve. Solid-State Electronics, v. 56, n. 1, p. 89-94, 2011.
- [10] COLINGE, J. P. "Silicon-On-Insulator Technology: Materials to VLSI", 3rd ed., pp. 151-200, pp. 303-322, 2004.
- [11] FASARAKIS, N. et al. Analytical modeling of threshold voltage and interface ideality factor of nanoscale ultrathin body and buried oxide SOI MOSFETs with back gate control. IEEE Transactions on Electron Devices, Piscataway, v. 61, n. 4, p. 969-975, Apr. 2014.
- [12] HIBLOT, Gaspard et al. Analytical model for the inversion gate capacitance of DG and UTBB MOSFETs at the quantum capacitance limit. IEEE Transactions on Electron Devices, v. 62, n. 5, p. 1375-1382, 2015.
- [13] RUDENKO, Tamara et al. Revision of interface coupling in ultra-thin body silicon-on-insulator MOSFETs. Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics, 2013
- [14] COLINGE, J. P. "FinFETs and Other Multi-Gate Transistors", Ed., pp. 28-30, 2008.