

CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE OXINITRETOS DE SILÍCIO ULTRAFINOS PARA PORTA MOS OBTIDOS POR IMPLANTAÇÃO DE NITROGÊNIO NA ESTRUTURA Si-poli/SiO₂/Si

C.A.A. de Souza¹; S.G. dos Santos Filho^{1*}; J.A. Diniz²

¹ USP, Laboratório de Sistemas Integráveis, Av. Prof. Luciano Gualberto, 158 – Trav. 3, 05.508-900, São Paulo, SP

² UNICAMP, FEEC/CCS, C.P 6061, 13.083-970, Campinas, SP

Recebido: 17 de agosto, 2007; Revisado: 25 de setembro, 2007

Palavras-chave: nitrogênio, implantação iônica, silício, porta MOS.

RESUMO

A incorporação de boro em óxidos de porta MOS ultrafinos (espessura < 3,0 nm) traz sérios problemas associados ao aparecimento de cargas fixas ($Q_{ss}/q > 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) como por exemplo, a variação da tensão de limiar. Observamos que a implantação de uma dose moderada de nitrogênio na faixa de 1×10^{13} a $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ com pico próximo à interface Si-poli/SiO₂ promoveu a redução da incorporação de boro dentro do corpo do dielétrico e dentro do substrato de silício conforme pudemos inferir a partir das medidas capacitância-tensão (C-V) de alta e baixa frequência. É importante destacar que o boro foi difundido a partir de óxido dopado depositado sobre a estrutura através da técnica "Spin On Glass" (SOG). Observamos também que com o aumento da dose de nitrogênio implantado na estrutura Si-poli/SiO₂/Si, a densidade de estados de interface (D_{it}) foi menor que $1 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ e a concentração efetiva de dopantes (N_A) no substrato de silício não se alterou de forma substancial. Esses resultados sugerem que esse processo alternativo estudado para a obtenção de silício policristalino P⁺ de porta pode ser empregado em tecnologias CMOS em escala industrial.

ABSTRACT

Boron incorporation into ultrathin MOS gate oxides (thickness < 3.0 nm) promotes serious troubles concerning to the achievement of fixed charges ($Q_{ss}/q > 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) like threshold-voltage changing, for example. We observed that the implantation of a moderate dose of nitrogen, in the range of 1×10^{13} to $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ with peak profile next to the Si-poli/SiO₂ interface, decreases boron incorporation into the dielectric bulk as we inferred from high and low frequency capacitance-voltage (C-V) measurements. It is important to point out that boron was diffused from doped oxide deposited on the structure by means of Spin On Glass (SOG) technique. We also observed that higher nitrogen dose makes the interface states density (D_{it}) lower than $1 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ and the effective dopant concentration (N_A) in the silicon substrate remain almost unchanged. These results suggest that this alternative process can be employed for CMOS technologies in industrial scale.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia CMOS ocupa atualmente mais de 85% do mercado de dispositivos semicondutores sendo que a redução das dimensões dos dispositivos tem promovido aumento substancial da velocidade de chaveamento e tem permitido o aumento exponencial do número de transistores por pastilha associado também à redução dos custos de produção dos circuitos integrados [1]. Porém, ao utilizar silício policristalino (Si-poli) P⁺ dopado degeneradamente com boro, observa-se concentrações expressivas de boro ao longo da estrutura SiO₂-Si após ciclos térmicos inerentes ao processo de fabricação, principalmente para espessuras de SiO₂ menores que 3 nm [2]. A alteração da dopagem no substrato de silício promove a variação de diversos parâmetros elétricos da estrutura MOS incluindo a tensão de faixa plana (V_{FB}), a tensão de limiar (V_T), a inclinação de sublimar e a resistência de canal. Tais alterações também estão associadas à geração de defeitos devido ao acúmulo de boro capazes de aprisionar portadores de carga no corpo do SiO₂, deixando o processo completamente não reprodutível quanto ao valor da tensão de limiar [1,2]. Uma outra limitação importante é a corrente de tunelamento que aumenta exponencialmente com a redução da espessura do dielétrico de porta de forma que, conforme reportado, o uso do SiO₂ como dielétrico de porta MOS fica limitado a espessuras maiores do que cerca de 1,6 nm [3].

Para minimizar esses efeitos em óxidos ultrafinos, tem sido observado que pequenas quantidades de nitrogênio incorporadas no óxido de porta, principalmente junto às interfaces Si-poli /SiO₂ e SiO₂/Si, traz melhoras substanciais no desempenho elétrico dos dispositivos MOS devido à formação de monocamadas de oxinitreto de silício (SiO_xN_y) junto a essas interfaces. Das vantagens oferecidas pelo SiO_xN_y [4], é possível citar algumas, tais como: (i) funcionamento como camada de barreira à difusão resultando na minimização da concentração de boro no SiO₂ e na região de canal dos dispositivos PMOSFET; (ii) redução da corrente de fuga; (iii) melhora da imunidade contra portadores gerados durante a ionização por impacto junto ao dreno (portadores "quentes") e (iv) maiores campos de ruptura do dielétrico de porta. Tem sido reportado que uma monocamada de SiO_xN_y formada ao longo da interface SiO₂/Si pode reduzir a corrente de fuga

* sgsantos@lsi.usp.br

em até três ordens de grandeza e ainda pode funcionar como barreira de difusão para o boro proveniente do Si-poli [5]. Com o controle preciso da incorporação de nitrogênio nas interfaces Si-poli/SiO₂ e SiO₂/Si, consegue-se aliar as vantagens oferecidas pelo SiO₂ térmico com as vantagens oferecidas pela adição de nitrogênio, como barreira à umidade, aos íons alcalinos e ao boro. A literatura reporta que a formação de monocamadas de SiO_xN_y possibilita trabalhar com espessuras de SiO₂, ainda que de forma crítica, próximo de 0,7 nm [6]. Para dimensões iguais a esse valor que é da ordem das dimensões das ligações químicas nas moléculas de SiO₂, observa-se que, as funções de onda da porta e do substrato junto às interfaces se superpõem, determinando um curto-circuito através do dielétrico, tornando o SiO₂ inútil como isolante.

Ainda não se conhecem os mecanismos de aprisionamento do boro ao longo das monocamadas de SiO_xN_y formadas nas interfaces. Porém, pode-se inferir [7] alguns mecanismos: (i) átomos de nitrogênio permitem uma ligação química a mais do que as duas ligações estabelecidas pelos átomos de oxigênio, diminuindo a quantidade de ligações incompletas passíveis de saturação pelo hidrogênio junto às interfaces [7] e (ii) átomos de nitrogênio são menores do que os átomos de oxigênio permitindo uma maior densidade de átomos de nitrogênio nas interfaces Si-poli/SiO₂ e SiO₂/Si [7]. Essas duas inferências possibilitam uma rede mais coesa e resistente e, ao mesmo tempo, permitem que o boro seja barrado fisicamente pelo SiO_xN_y de maior densidade ou ainda pela captura individual do boro pelos sítios de nitrogênio formados. Gusev [7] sugere que o boro é aprisionado cineticamente junto à interface Si/SiO_xN_y ou por contribuições de energia livre ainda não plenamente entendidas.

Por outro lado, observa-se que a introdução de uma dose excessiva de nitrogênio no dielétrico de porta além de cerca de 5% em peso pode desencadear um aumento do parâmetro carga efetiva (Q_{SS}/q). A escassez de nitrogênio (< 1%), por sua vez, não favorece a formação da barreira contra a difusão de boro. Além disso, o excesso de nitrogênio no corpo do Si-poli aumenta sua resistência de folha [7,8].

No presente trabalho apresentamos a influência da implantação iônica de nitrogênio próximo às interfaces Sipoli/Si e SiO₂/Si nas características elétricas de capacitores MOS com porta dopada com boro através da técnica de difusão a partir de SOG (*Spin On Glass*) ao invés da técnica mais comum baseada na implantação iônica convencional uma vez que a técnica SOG é uma alternativa de baixo custo e ainda muito pouco estudada para a dopagem do Si-Poli [1].

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Foram utilizadas lâminas de Si tipo p com 3 polegadas de diâmetro, orientação cristalográfica <100> e resistividade na faixa de 1 a 10 Ω.cm. Inicialmente, as lâminas foram submetidas ao processo de limpeza química utilizando procedimento padrão para remoção de contaminantes metálicos e material particulado, composta das seguintes etapas [12,14-16]:

- 1- Enxágüe em água deionizada por 5 min;

- 2- Imersão em solução 0,25NH₄OH(35%): 1H₂O₂: 4H₂O por 15 min. na temperatura de 80°C;
- 3- Enxágüe em água deionizada por 5 min;
- 4- Imersão em solução 1HCl(36%): 1H₂O₂(30%): 4H₂O por 15 min na temperatura de 80°C;
- 5- Enxágüe em água deionizada por 5 min;
- 6- Imersão em solução 1HF(49%): 20 H₂O por 100 s na temperatura ambiente.

Na seqüência, as lâminas foram oxidadas na temperatura de 800°C durante 20 min., utilizando fluxo de 1.5 L/min de oxigênio ultra puro e 2 L/min de uma mistura de N₂+ 10% H₂ seguido por passivação do SiO₂ em ambiente de N₂ por 10 min na mesma temperatura. As medidas elipsométricas efetuadas no comprimento de onda de 633 nm indicaram camadas de SiO₂ uniformes com espessura média de 2,6 nm com incerteza de apenas 2% para índice de refração fixo de 1,46.

Após a oxidação, foi realizada a deposição de Si-poli utilizando a técnica LPCVD com os seguintes parâmetros de processo: 630 °C por 30 min a uma pressão de 600 m torr e fluxos de 49,5 sccm para SiH₄ e 280 sccm para N₂. As espessuras médias obtidas foram de 341 ± 15 nm (pelo método perfilométrico) e 321 ± 1 nm (pelo método elipsométrico, no comprimento de onda de 633 nm). Em seguida, foram feitas as implantações iônicas de nitrogênio com energia de 110 keV (ajustada por simulação SRIM, *Stopping and Range of Ions in Matter*) em quatro lâminas onde foram fabricados os capacitores MOS. Com essa energia, a máxima concentração de nitrogênio situou-se próximo às interfaces como indicado na figura 1. Quatro doses foram utilizadas, a saber: 1x10¹³, 1x10¹⁴, 1x10¹⁵ e 5x10¹⁵ cm⁻². Na seqüência, foi realizado recozimento térmico rápido (RTP) na temperatura de 1070 °C por 10 s nas quatro lâminas implantadas com as diferentes doses de nitrogênio mencionadas sendo que a etapa RTP tende a concentrar o nitrogênio junto às interfaces [10].

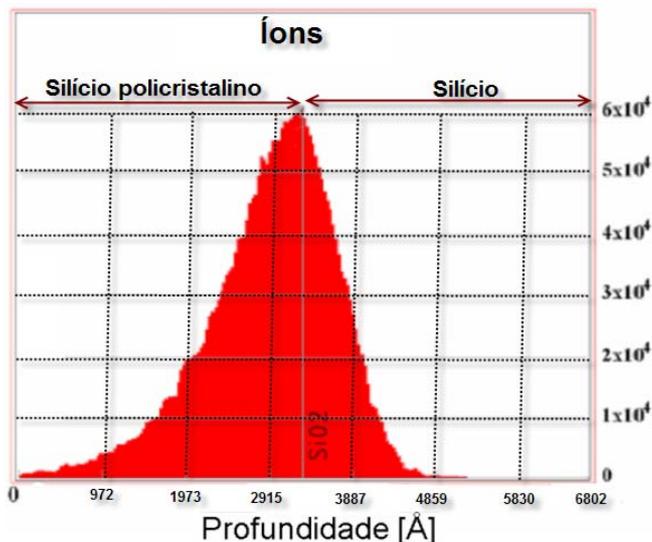


Figura 1 - Perfil do nitrogênio ao longo da estrutura Si-poli (340 nm)/SiO₂(2,6 nm)/Si após simulação SRIM [www.srim.org] com energia de 110 keV.

Antes da implantação iônica e do processo de RTP, foram feitas as limpezas químicas com o mesmo procedimento de limpeza padrão já descrito anteriormente. Após a etapa de recozimento térmico rápido, o Si-poli foi dopado com boro utilizando a técnica SOG, ou seja, difusão do dopante boro no Si-poli a partir do SOG na temperatura de 1050°C durante 30 minutos.

A Tabela 1 mostra a resistência de folha no Si-poli (R_{poli}) obtida após a dopagem com boro seguido pelo processo de difusão a 1050 °C por 30 min nas lâminas previamente implantadas com nitrogênio. Nesta tabela podemos perceber que os valores de R_{poli} ficaram em torno de 70 Ω/\square para doses de nitrogênio na faixa de 1×10^{13} a 1×10^{15} cm^{-2} o que corresponde à concentrações volumétricas de cerca de $2,7 \times 10^{20}$ cm^{-3} . Somente a dose de 5×10^{15} cm^{-2} apresentou um valor R_{poli} maior do que o esperado possivelmente devido à maior quantidade de nitrogênio introduzido pela maior dose de implantação que poderia estar, por exemplo, associada à diminuição do tamanho efetivo de grão pelo aumento da quantidade de defeitos. Como podemos observar na Tabela 1, a concentração volumétrica de boro obtida a partir da R_{poli} resultou um pouco menor.

Tabela 1 - Valores da resistência de folha (R_{poli}) e da concentração volumétrica (N_{poli}) do Si-poli após a difusão a 1050 °C por 30 min.

Dose de N ⁺ (cm^{-2})	R_{poli} (Ω/\square)	N_{poli} (1×10^{20} cm^{-3})
1×10^{13}	67 ± 5	2,75
1×10^{14}	69 ± 6	2,66
1×10^{15}	70 ± 6	2,63
5×10^{15}	105 ± 15	1,75

Após a dopagem do Si-poli, as lâminas ainda passaram pelas seguintes etapas:

- 1- Remoção do SOG e deposição do alumínio (200 nm) por evaporação térmica;
- 2- Fotolitografia e corrosão úmida do alumínio seguido de corrosão seca do Si-poli em SF₆ para definir capacitores MOS com área de 9×10^{-4} cm^2 ;
- 3- Deposição do alumínio no verso da lâmina;
- 4- Sinterização final na temperatura de 420°C por 20min. em ambiente de N₂ +10%H₂ [13].

Após a fabricação dos capacitores MOS, dielétricos de porta crescidos e nitretados foram caracterizados eletricamente com a ajuda dos equipamentos HP4280 e HP4140 para extração das curvas CxV de alta e baixa frequência, respectivamente. Foram obtidos os parâmetros espessura equivalente em SiO₂ do dielétrico de porta (EOT), concentração de dopantes no substrato P (N_A), densidade efetiva de cargas no dielétrico (Q_{SS}/q) e densidade de estados de interface (D_{it}).

A capacitância máxima na região de acumulação (C_{max}) está relacionada com a capacitância do óxido por unidade de área (C_{ox}) através da área de porta (*gate*) do capacitor, isto é [11]:

$$C_{\text{max}} = C_{\text{ox}} \cdot A_g \quad (1)$$

onde A_g é a área de porta do capacitor.

Desta forma, a espessura equivalente do dielétrico (EOT) resulta:

$$\text{EOT} = \frac{\epsilon_o \cdot \epsilon_{\text{ox}}}{C_{\text{max}}} \cdot A_g \quad (2)$$

onde ϵ_{ox} é permissividade relativa do óxido de silício e ϵ_o é a permissividade do vácuo ($8,854 \times 10^{-14}$ F/cm).

A máxima largura da região de depleção ocorre quando a capacitância de alta frequência atinge o seu valor mínimo em inversão forte (C_{min}) o qual corresponde à associação série entre a capacitância do óxido e a capacitância máxima de depleção do silício. A capacitância máxima de depleção do silício por unidade de área ($C_{\text{s,max}}$) pode então ser escrita como sendo [11]:

$$C_{\text{s,max}} = \frac{1}{A_g} \left[\frac{1}{\frac{1}{C_{\text{min}}} - \frac{1}{C_{\text{max}}}} \right] \quad (3)$$

Por sua vez, a capacitância máxima de depleção do silício por unidade de área está relacionada com a largura máxima da região de depleção como segue:

$$W_{\text{d,max}} = \frac{\epsilon_o \cdot \epsilon_{\text{ox}}}{C_{\text{s,min}}} \quad (4)$$

Por outro lado, a resolução da equação de Poisson na região de depleção permite obter o potencial de superfície na região de inversão que pode ser escrito como sendo [11]:

$$\psi_{\text{sm}} = \frac{q \cdot N_A \cdot W_{\text{d,max}}^2}{2 \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_s} \quad (5)$$

onde:

$$\phi_F = \pm \frac{kT}{q} \cdot \ln \left[\frac{N_A}{n_i} \right]$$

ϕ_F é o potencial de Fermi, k é a constante de Boltzman, T é a temperatura em Kelvin, q é a carga elementar, N_A é a concentração de dopantes no substrato e n_i é a concentração intrínseca de portadores na temperatura T ($n_i = 1,45 \times 10^{10}$ cm^{-3} para $T=300\text{K}$).

Existe uma situação particular de tensão de polarização de porta ($V_G = V_{\text{FB}}$) na qual o diagrama de faixas de energia do capacitor MOS fica plano, isto é, $\psi_s = 0$ ($Q_s=0$) e $V_{\text{ox}} = 0$. Neste ponto de operação demonstra-se que a capacitância do silício na situação de faixa plana é dada por [11]:

$$C_{\text{FB}} = \left[\frac{q^2 \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_s \cdot N_A}{K \cdot T} \right]^{1/2} \quad (6)$$

A capacitância de faixa plana do capacitor MOS, C_{FB} , é definida como sendo a associação série da capacitância de faixa plana do silício com a capacitância do óxido, ou seja [11]:

$$C_{FB} = \frac{A_g}{\frac{1}{C_{FB_s}} + \frac{1}{C_{ox}}} \quad (7)$$

A concentração efetiva de cargas no óxido de porta (Q_{SS}/q) é obtida a partir da diferença entre ϕ_{MS} (diferença entre as funções trabalho do metal e do semiconductor = $-0,6 - \phi_F$) e V_{FB} (tensão de faixa plana) [11]:

$$\frac{Q_{SS}}{q} (\psi_s = 0) = [\phi_{MS} - V_{FB}] \frac{C_{ox}}{q} \quad (8)$$

onde a tensão de faixa plana é extraída a partir da curva $C-V_{AF}$ experimental fazendo-se a correspondência com a capacitância de faixa plana calculada a partir da equação (7).

Os estados eletrônicos de interface localizam-se espacialmente na interface Si-SiO₂ e distribuem-se em energia ao longo da faixa proibida do semiconductor. Estes estados podem ser do tipo aceitador, os quais ficam carregados negativamente quando recebem elétrons, ou do tipo doador, que ficam neutros quando recebem elétrons [11,12]. Associado a estes estados existe uma capacitância de estados de interface C_{it} , função do potencial de superfície, que também está em paralelo com a capacitância de depleção e pode ser obtida a partir das curvas de $C \times V$ de alta e baixa frequência como [11]:

$$C_{it}(V_G) = \left[\frac{1}{C_{BF}(V_G)} - \frac{1}{C_{ox}A_g} \right]^{-1} - \left[\frac{1}{C_{AF}(V_G)} - \frac{1}{C_{ox}A_g} \right]^{-1} \quad (9)$$

onde:

$$\psi_s(V_G) = \int_{V_{FB}}^{V_G} \left[1 - \frac{C_{BF}}{C_{ox}} \right] dV_G \quad (10)$$

e

$$D_{it}(E = E_i + q(\phi_F - \psi_s)) = \frac{C_{it}(\psi_s)}{q} \quad (11)$$

A_g é a área do capacitor, $C_{AF}(V_G)$ é a capacitância de alta frequência, $C_{BF}(V_G)$ é a capacitância de baixa frequência, V_{FB} é a tensão de porta na situação de faixa plana ($\psi_s = 0$ e $V_{ox} = 0$), E é a energia ao longo da faixa proibida correspondente a ψ_s , E_i é a energia no meio da faixa proibida, ϕ_F é o potencial de Fermi, q é a carga elementar e D_{it} (eV⁻¹cm⁻²) é densidade de estados de interface obtida a partir de C_{it} .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Difusão de boro através da estrutura Si-poli/SiO₂/Si

Inicialmente, visando avaliar o quanto de boro difunde do Si-poli em direção ao substrato, fabricamos estruturas Si-poli/SiO₂/Si sem qualquer implantação de nitrogênio e realizamos difusão de boro através dessas estruturas a partir do SOG em diferentes temperaturas. A Tabela 2 mostra as temperaturas de difusão empregadas para tempo constante de 30 min. Esta Tabela também mostra as resistências de folha medidas pelo método de 4 pontas [11] para a camada de Si-poli (R_{poli}) e para o substrato de silício (R_{Si}) após a remoção do Si-poli em plasma de SF₆ e do dielétrico de porta em solução diluída de ácido fluorídrico. Também, está mostrado na Tabela 2, a concentração volumétrica de boro calculada do a partir de R_{poli} .

É interessante destacar que R_{poli} diminui com o aumento da temperatura na faixa de 950°C à 1100°C indicando que a difusão de boro foi mais intensa nas temperaturas maiores. Por outro lado, é importante destacar que a concentração volumétrica de boro [9] aumenta com a redução de R_{poli} .

Também é importante chamar a atenção para o fato de que R_{Si} reduz progressivamente com o aumento da temperatura de difusão. Tal fato indica que o boro além de atingir o óxido de porta também chega a difundir no substrato de silício.

Tabela 2 - R_{poli} , R_{Si} e N_{poli} após difusão nas temperaturas a 950, 1000, 1050 e 1100 °C por 30 min. O valor da resistência de folha do substrato de silício de partida (R_{Si}) foi de (212 ± 4) Ω/□

Temperatura (°C)	R_{poli} (Ω/□)	N_{poli} (1x10 ²⁰ at/cm ³)	R_{Si} (Ω/□)
950	120 ± 6	0,5	198 ± 9
1000	95 ± 4	0,9	174 ± 3
1050	72 ± 6	2,6	158 ± 6
1100	45 ± 4	4,1	148 ± 6

A escolha da temperatura de 1050°C para realizar corriqueiramente a difusão de boro no Si-poli baseou-se no fato da concentração volumétrica resultar acima de 1x10²⁰ cm⁻³ de forma que o efeito de depleção no Si-poli fosse eliminado [10].

Por outro lado, de acordo com Herden et al.[8], a camada n-tretada junto à interface Si-poli/SiO₂ impede com eficiência a difusão de átomos de boro implantados no Si-poli até a temperatura de 1050°C quando se deseja obter concentrações de boro uniformes acima de 1x10²⁰ cm⁻³. Para temperaturas maiores, pode ocorrer difusão substancial de boro em direção ao substrato e variações na concentração de boro junto à interface Si-poli/SiO₂. No item a seguir, vamos mostrar que a implantação iônica prévia de nitrogênio seguido de recozimento térmico rápido permite impedir que ocorra a difusão de boro de forma substancial em direção ao substrato. Para tanto, obtivemos a concentração efetiva de portadores a partir da característica C-V dos capacitores MOS fabricados para diferentes doses de implantação de nitrogênio.

3.2 Camadas de SiO₂ nitretado como barreira de difusão

No presente trabalho, realizamos a difusão de boro a partir do SOG e comprovamos comportamento similar ao caso de boro implantado quanto à capacidade de impedir a difusão de boro em direção ao substrato de silício.

Foram obtidas as curvas capacitância – tensão em alta frequência (C-V_{AF}) utilizando o medidor HP 4280(1MHz) e as curvas capacitância – tensão em baixa frequência (C-V_{BF}) no medidor HP 4140(curva quase estática) nos capacitores MOS com área de 300 μm x 300 μm como já mencionado nos procedimentos experimentais. Foram fabricados capacitores MOS em diferentes lâminas de silício utilizando diferentes doses de nitrogênio (1x10¹³, 1x10¹⁴, 1x10¹⁵ e 5x10¹⁵ at/cm²) seguido de difusão de boro a partir do SOG. As medidas C-V foram feitas no escuro para atenuar o efeito da luz nos capacitores MOS e com polarização inicial partindo da inversão em direção à acumulação para evitar o efeito da depleção profunda [11].

A figura 2 mostra as curvas típicas de alta e baixa frequência (C-V_{AF} e C-V_{BF}, respectivamente) típicas para um mesmo capacitor MOS fabricado para uma dose de nitrogênio de 1x10¹³ cm⁻³. Observou-se um deslocamento entre as duas curvas na região de depleção indicando que a carga equivalente no dielétrico devido à presença do nitrogênio manifesta-se de forma diferente em alta e baixa frequência. Observa-se que a curva de alta frequência está levemente deslocada para a esquerda indicando uma maior concentração de carga efetiva no dielétrico de porta. Tal fato não invalida a extração de D_{it} (o leve deslocamento horizontal deve ser descontado) e deve estar associado à modificação da estrutura do dielétrico pelo nitrogênio implantado cujos defeitos carregam-se de forma diferente dependendo da frequência de medida.

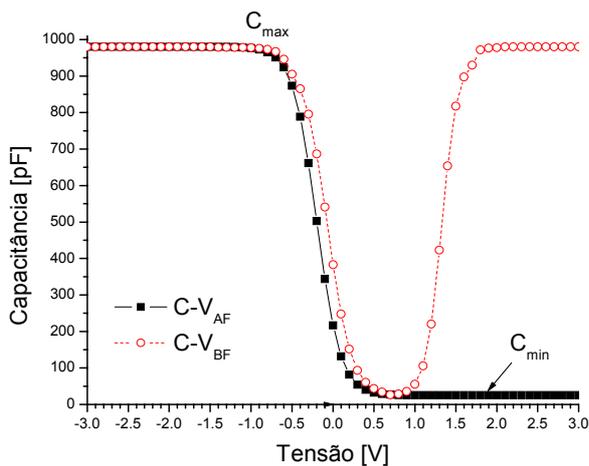


Figura 2 - Curvas C-V_{AF} e C-V_{BF} típicas extraídas para um mesmo capacitor MOS fabricado com dose de nitrogênio de 1x10¹³ at/cm³.

A figura 3 mostra as curvas C-V_{AF} típicas levantadas para as diferentes doses de nitrogênio. Inicialmente verificamos que a grande maioria dos capacitores MOS medidos (> 30/ lâmina) apresentaram valores de tensão de faixa plana (V_{FB}) reprodutíveis e valores de C_{max} (capacitância máxima) e C_{min}

(capacitância mínima) com patamares bem estáveis e com baixa dispersão para cada dose de nitrogênio empregada.

Por outro lado, foi observado que as curvas C-V apresentaram maiores deslocamentos para a esquerda para maiores doses de nitrogênio o que significa menores valores de V_{FB}. Esse fenômeno está associado ao aumento de Q_{ss} devido às cargas induzidas pela implantação de nitrogênio no corpo do SiO₂. Para extrair V_{FB} utilizou-se as curvas C-V_{BF} que proporcionaram um maior tempo para acomodação das cargas, principalmente na interface dielétrico/Si [9]. A figura 4 ilustra as curvas C-V_{BF} típicas também levantadas para diferentes doses de nitrogênio. Como esperado, elas apresentam o mesmo tipo de comportamento que as curvas C-V_{AF}, isto é, também ocorre maior deslocamento para a esquerda para maiores doses de nitrogênio devido ao aumento de Q_{ss}/q.

A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros extraídos a partir das curvas C-V_{AF} e C-V_{BF}: espessura equivalente do dielétrico de porta (EOT), concentração efetiva de dopantes no substrato de silício (N_A, obtido através da equação 5), densidade de estados de interface (D_{it}) e Q_{ss}/q. Foi observado que quanto maior a dose de nitrogênio utilizada, menores os valores de N_A. A explicação para esse comportamento reside no fato de que a concentração de nitrogênio ao longo das interfaces Si-poli/SiO₂ e SiO₂/Si aumenta com a dose implantada o que resulta em uma menor difusão de boro em direção ao substrato de silício. Especificamente, a lâmina processada com dose de 5.10¹⁵ cm⁻² apresentou completa supressão da difusão de boro já que a dopagem obtida corresponde à da lâmina virgem de partida. O nitrogênio incorporado ao Si-poli, como já mencionado, não afeta substancialmente a concentração de dopantes no corpo do Si-poli, isto é, apenas atua como barreira de difusão junto às interfaces.

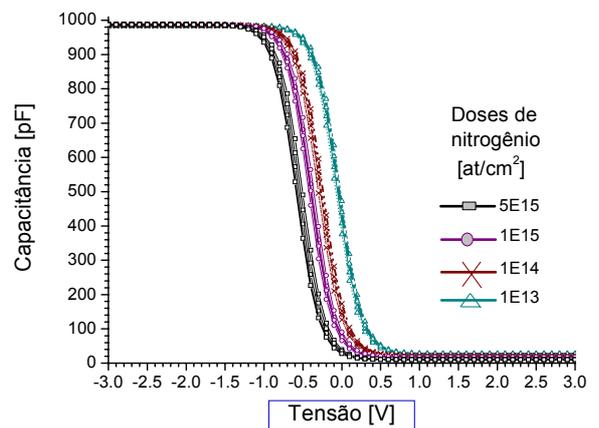


Figura 3 - Medidas C-V_{AF} mais representativas para as quatro doses de nitrogênio implantadas.

A extração da densidade de estados de interface foi feita como descrito nos procedimentos experimentais. Como indicado na Tabela 3, com o aumento da dose de nitrogênio ocorreu diminuição de D_{it}. Esse fato está associado a uma interface dielétrico/Si com menor densidade de ligações incompletas o que implica em menor quantidade de cargas aprisionadas (Q_{it}).

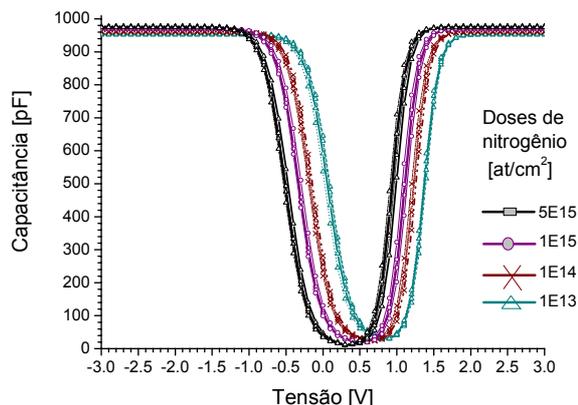


Figura 4 - Medidas C-V_{BF} mais representativas para as quatro doses de nitrogênio implantadas.

Tabela 3 - EOT, N_A, D_{it} e Q_{ss}/q.

Dose de N ⁺ (cm ⁻²)	EOT [nm]	N _A (1x10 ¹⁵ cm ⁻³)	D _{it} (1x10 ¹¹ eV ⁻¹ cm ⁻²)	Q _{ss} /q (1x10 ¹¹ cm ⁻²)
1x10 ¹³	2,9	7,7	2,3	<0
1x10 ¹⁴	2,9	4,9	1,6	7,7
1x10 ¹⁵	2,9	2,9	1,3	8,9
5x10 ¹⁵	2,9	0,95	0,8	26

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho investigamos a influência da implantação iônica de nitrogênio próximo às interfaces Si-poli/SiO₂ e SiO₂/Si nas características elétricas de capacitores MOS, com porta dopada com boro através da técnica de difusão a partir de SOG ao invés da técnica mais comum baseada na implantação iônica convencional.

A implantação iônica de nitrogênio na estrutura Si-poli/SiO₂/Si teve como principal melhoria a supressão da difusão do boro através da interface Si-poli/SiO₂, isto é, o nitrogênio promoveu a redução da incorporação de boro dentro do corpo do dielétrico e dentro do substrato de silício conforme pudemos inferir a partir das medidas capacitância-tensão (C-V) de alta e baixa frequência. No entanto, verificamos que o aumento da dose de implantação de nitrogênio promoveu o aumento de Q_{ss}.

Também observamos que, para maiores doses de nitrogênio, houve um aumento moderado da concentração efetiva de dopantes no substrato. Especificamente, a lâmina processada com dose de nitrogênio mais alta de 5.10¹⁵ cm⁻² apresentou completa supressão da difusão de boro já que o valor obtido da dopagem corresponde à da lâmina virgem de partida.

Finalmente, com o aumento da dose de nitrogênio ocorreu diminuição em D_{it}. Esse fato foi associado a uma interface dielétrico/Si com menor densidade de ligações incompletas e, portanto, com menor quantidade de cargas aprisionadas (Q_{it}). Por outro lado, os resultados apresentados no presente artigo sugerem que o processo alternativo estudado para a obtenção de silício policristalino P+ de porta pode ser empregado em tecnologias CMOS em escala industrial.

AGRADECIMENTOS

Cesar A.A. de Souza agradece ao CNPq pelo apoio financeiro. Os autores agradecem ao Laboratório de Sistemas Integrados (LSI-EPUSP) e ao Centro de Componentes Eletrônicos (CCS – Unicamp) pelos equipamentos concedidos.

REFERÊNCIAS

- ZEITZOFF, P.M.; CHUNG, J.E., *IEEE Circuits & Devices Magazine* Jan./Feb (2005) 4.
- LUCOVSKY, G., *Journal of Non-Crystalline Solids* 26 (1999) 254.
- GREEN, M. L., *Journal of Applied Physics* 90 (2001) 2057.
- LEE, D.; PARKER, C.; HAUSER, J.; LUCOVSKY, G., *Journal of Vacuum. Science and Technology B* 13 (1995) 1778.
- ONO, Y.; MA, Y.; HSU, S.T., *Materials Research Society Symposium Proceedings* 567 (1999) 39.
- MULLER, D.A.; SORSCH, T.; MOCCIO, S.; BAUMANN, F.H.; EVANS-LUTTERODT, K.; TIMP, G., *Nature* 399 (1999) 758.
- GUSEV, E.P.; LU, H.C.; GARFUNKEL, E.L.; GUSTAFFSSNN, T.; GREEN, M.L., *IBM Journal of Research and Development* 43 (1999) 265.
- HERDEN, M.; BAUER, A.J.; BEICHELE, M.; RYSSEL, H., *Solid State Electronics* 45 (2001) 1251.
- SETO, J.Y.W., *Journal of Applied Physics Letters* 46 (1975) 5247.
- RODRIGUES, M., *Caracterização Elétrica de Capacitores Obtidos através de Tecnologia Ultra-Submicrométrica*. Dissertação de Mestrado (2006). USP- Escola Politécnica, São Paulo (SP).
- NICOLLIAN, E.H.; BREWS, J.R., *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*, Wiley, New York (1982).
- SZE, S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, New York (1981).
- BALK, P., *The Si-SiO₂ System*, Elsevier, The Netherlands, (1988).
- KERN, W., *Journal of the Electrochemical Society* 137 (1990) 1887.
- KERN, W., *RCA Review* 31 (1970) 187.
- DOS SANTOS FILHO, S.G.; HASENACK, C.M.; SALAY, L.C.; MERTENS, P.W., *Journal of the Electrochemical Society* 142 (1995) 902.