

## INFLUÊNCIA DAS LIMPEZAS QUÍMICAS ÚMIDAS $H_2O/H_2O_2/NH_4OH$ E $H_2O/HF/HNO_3$ NA MICRO-RUGOSIDADE DE LÂMINAS DE SILÍCIO

Willian Aurélio Nogueira e Sebastião Gomes dos Santos Filho  
LSI/PSI/EPUSP

Palavras chave: Limpeza Química, RCA, micro-rugosidade.

### RESUMO

*O objetivo desse estudo é analisar o efeito de algumas etapas químicas de receitas de limpeza convencionais na micro-rugosidade superficial de lâminas de silício. Foram estudados os efeitos de variações na concentração do hidróxido de amônia na solução  $NH_4OH : H_2O_2 : H_2O$  e a concentração do ácido nítrico na solução  $HNO_3 : HF : H_2O$ .*

*A micro-rugosidade da lâmina de silício, após a limpeza química, foi caracterizada pela técnica de microscopia de força atômica utilizando o equipamento "Atomic Force Microscopy – Nanoscope Digital" em varreduras de  $1\mu m \times 1\mu m$ . Com base nos resultados, foi possível apontar as condições que resultam em menor micro-rugosidade superficial.*

### ABSTRACT

*The aim of this study is to analyze the influence of some chemical steps used in standard cleaning recipes on the surface micro-roughness of silicon wafers. It was studied the effect of varying the ammonium hydroxide concentration in the  $NH_4OH : H_2O_2 : H_2O$  solution and the nitric acid concentration in the  $HNO_3 : H_2O_2 : H_2O$  solution.*

*The silicon wafer micro-roughness was characterized by atomic force microscopy technique by using an "Atomic Force Microscopy – Nanoscope Digital" equipment at different scans of  $1\mu m \times 1\mu m$ . Based on the results, it was possible to point the conditions that resulted in lower surface micro-roughness.*

### 1. INTRODUÇÃO

A busca constante pelo aumento na integração de dispositivos em sistemas integrados é caracterizada por uma acentuada redução nas dimensões verticais e horizontais [1]. Essa redução das dimensões dos dispositivos faz melhorar sua performance [2, 3].

Como exemplo de tecnologias que seguem essa evolução, pode-se destacar as CMOS de dimensões reduzidas e as memórias dinâmicas DRAMs [4]. Dentre as reduções dimensionais está a da espessura do óxido de porta do capacitor MOS, que por sua vez é um dos principais parâmetros no projeto de dispositivos CMOS e das memórias DRAMs. Porém, essa redução gradual na espessura do óxido de porta não pode ser acompanhada de perdas de qualidade e/ou confiabilidade, de robustez dielétrica, introdução de mecanismos parasitários, etc. [5,6].

A literatura indica que interfaces Si/SiO<sub>2</sub> menos rugosas implicam em menores correntes de fuga através da camada de óxido, menores concentrações de armadilhas na interface

Si-SiO<sub>2</sub> e em maiores campos de ruptura da rigidez dielétrica [7, 8, 9, 10]. Assim, para manter ou mesmo aumentar a qualidade dos óxidos, apesar da redução na espessura, faz-se necessário um maior cuidado e um maior controle do processo de obtenção. Parâmetros como temperatura, contaminação metálica na lâmina ou nas soluções, velocidade de imersão das lâminas nas soluções e o caráter hidrofílico ou hidrofóbico das lâminas, tudo isso afeta a rugosidade superficial antes da oxidação de porta [11]. Um parâmetro a ser destacado é a quantidade de NH<sub>4</sub>OH proporcionalmente presente na solução SC1 (Standard Cleaning 1). Quanto menor a quantidade de NH<sub>4</sub>OH maior o tempo necessário para a retirada de partículas. Porém, a solução NH<sub>4</sub>OH/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O na proporção de 0,2/1/5, após 10 minutos, apresenta a mesma eficiência na remoção de partículas que na proporção de 1/1/5 [12]. Enquanto que a redução na concentração do NH<sub>4</sub>OH é acompanhada pela redução da rugosidade superficial de lâminas de silício [11].

Esta redução na rugosidade está associada a medidas feitas sobre óxido nativo formado sobre a lâmina de silício após os 10 minutos de fervura SC1 (1/1/5 ou 0.2/1/5). Para tornar exposta a superfície do silício é necessária a remoção do óxido nativo, o que não foi realizado nos trabalhos reportados pela literatura. Porém, a solução diluída de ácido fluorídrico (HF), tem sido empregada como última etapa de limpeza pré-oxidação, uma vez que propicia a remoção total do óxido nativo presente na superfície da lâmina de silício.

A adição de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) na solução diluída de HF permite a remoção de uma série de contaminantes superficiais, incluindo metais e partículas [13].

O trabalho que será apresentado a seguir envolve a influência da limpeza química na qualidade da interface Si/SiO<sub>2</sub>. Será apresentado um estudo do comportamento da rugosidade superficial para diferentes concentrações de produtos químicos específicos em soluções utilizadas em etapas de limpeza de lâminas de silício.

Analisaremos o efeito da SC1 na rugosidade superficial variando-se a concentração de NH<sub>4</sub>OH, apresentando as rugosidades superficiais antes e depois da remoção do óxido nativo. Também, investigaremos o efeito sobre a rugosidade superficial, da adição de HNO<sub>3</sub> à solução diluída de ácido fluorídrico.

### 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram estudadas duas soluções normalmente empregadas na limpeza química de lâminas de silício. Primeiramente, foi analisada a solução que constitui a primeira parte da conhecida limpeza RCA [14] que por sua vez é conhecida como limpeza padrão número 1 (SC1 - Standard Cleaning 1). Abaixo temos a descrição das oito variações da solução SC1 propostas, sendo quatro variações na concentração do com-

ponente  $\text{NH}_4\text{OH}$  e duas variações de temperaturas ( $71^\circ\text{C}$  e  $84^\circ\text{C}$ ).

- Solução 1:  $4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2$  (30%): $0,25\text{NH}_4\text{OH}$ (35%)  $71^\circ$  e  $84^\circ\text{C}$   
 Solução 2:  $4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2$  (30%): $1\text{NH}_4\text{OH}$  (35%)  $71^\circ$  e  $84^\circ\text{C}$   
 Solução 3:  $4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2$  (30%): $2\text{NH}_4\text{OH}$  (35%)  $71^\circ$  e  $84^\circ\text{C}$   
 Solução 4:  $4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2$  (30%): $5\text{NH}_4\text{OH}$  (35%)  $71^\circ$  e  $84^\circ\text{C}$

Em seguida, estudamos variações numa segunda solução de limpeza baseada em  $\text{HNO}_3$ . A seguir apresentamos as 4 variações dessa solução estudadas (todas na temperatura ambiente).

- Solução 5:  $20\text{H}_2\text{O} : 1\text{HF}$  (49%):  $5\text{HNO}_3$  (65%)  
 Solução 6:  $20\text{H}_2\text{O} : 1\text{HF}$  (49%):  $2\text{HNO}_3$  (65%)  
 Solução 7:  $20\text{H}_2\text{O} : 1\text{HF}$  (49%):  $1\text{HNO}_3$  (65%)  
 Solução 8:  $20\text{H}_2\text{O} : 1\text{HF}$  (49%):  $0,25\text{HNO}_3$  (65%)

Em todos os testes, utilizaram-se lâminas de 3 polegadas, tipo p, dopadas com boro, orientação  $\langle 100 \rangle$ , resistividade na faixa de 1 a  $10\Omega\text{cm}$  e espessura de  $381 \pm 5\mu\text{m}$ . Essas lâminas foram clivadas em quatro partes iguais e cada uma dessas partes foi destinada a cada uma das soluções descritas. As diferentes soluções foram aquecidas de forma a atingir temperaturas diferentes ( $71^\circ$  e  $84^\circ\text{C}$ ) e os pedaços de lâmina foram imersos, de forma individual, por 15 minutos nessas soluções.

Para obter um melhor controle da temperatura e minimizar um possível desequilíbrio motivado por evaporação preferencial de determinado componente ( $\text{H}_2\text{O}_2$  ou  $\text{NH}_4\text{OH}$ ), foi utilizada uma tampa de vidro sobre o bequer com um orifício por onde foi posicionado um termômetro para controle da temperatura. Após a imersão nas diferentes soluções, as amostras foram enxaguadas em água DI por 5 minutos, seguido de secagem em jato de nitrogênio.

O período entre o término da preparação das amostras e a análise no microscópio de força atômica (AFM) foi de aproximadamente 12 horas. Durante esse tempo as amostras foram acondicionadas em porta amostras de vidro, devidamente limpos que por sua vez, foram mantidos em ambiente de sala limpa até o momento de serem analisadas. Em seguida, utilizando AFM, foram determinados os valores de rugosidade superficial. Para as análises de microscopia de força atômica foi utilizado o equipamento “Atomic Force Microscopy – Nanoscope E Digital, Inc.”.

Nos instantes que antecederam a medida AFM as amostras foram então clivadas em pedaços de aproximadamente  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  para assim serem posicionados no porta amostra do Nanoscope. Em seguida foram obtidas varreduras de  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$  utilizando uma ponta de nitreto de silício padrão, também da Digital. A força de interação observada entre a amostra e a superfície foi de aproximadamente  $50\text{nN}$  [15].

Numa etapa seguinte, as 8 amostras resultantes das diferentes soluções de limpeza baseadas em  $\text{NH}_4\text{OH}$  foram submetidas a uma nova etapa. Essas amostras foram imersas em uma solução de  $40\text{H}_2\text{O} : 1\text{HF}$ , por 30 segundos, seguido de um enxágüe em água DI por 60 segundos para remoção do óxido nativo. Em seguida, essas amostras foram imediatamente analisadas por microscopia de força atômica da mesma forma já descrita.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tabelas 1 e 2 apresentam os resultados de rugosidade RMS ( $R_{\text{RMS}}$ ), média ( $R_a$ ) e vale-pico ( $R_{\text{v-p max}}$ ), superficial observados nas amostras submetidas às diferentes soluções SC1 em diferentes temperaturas para a varredura de  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ .

Tabela 1 - Micro-rugosidade superficial obtida por técnica AFM para soluções com diferentes concentrações de  $\text{NH}_4\text{OH}$  a  $71^\circ\text{C}$ . Note que a amostra “r” é a amostra referência, ou seja, uma lâmina virgem, como recebida, sem tratamento.

Varredura de $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$	RMS (nm)	$R_a$ (nm)	$R_{\text{max}}$ PP (nm)
r	0,086	0,065	1,424
$4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:0,25\text{NH}_4\text{OH}$	0,100	0,079	0,888
$4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:1\text{NH}_4\text{OH}$	0,127	0,093	1,985
$4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:2\text{NH}_4\text{OH}$	0,103	0,081	1,326
$4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:5\text{NH}_4\text{OH}$	0,125	0,099	1,139

Tabela 2 – Micro-rugosidade superficial obtida por técnica AFM para soluções com diferentes concentrações de  $\text{NH}_4\text{OH}$  a  $84^\circ\text{C}$ . Note que a amostra “r” é a amostra referência, ou seja, uma lâmina virgem sem tratamento.

Varredura de $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$	RMS (nm)	$R_a$ (nm)	$R_{\text{max}}$ PP (nm)
r	0,086	0,065	1,424
$4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:0,25\text{NH}_4\text{OH}$	0,086	0,065	1,241
$4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:1\text{NH}_4\text{OH}$	0,137	0,104	1,536
$4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:2\text{NH}_4\text{OH}$	0,093	0,072	1,035
$4\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:5\text{NH}_4\text{OH}$	0,099	0,078	0,980

Observa-se na tabela 1 para  $71^\circ\text{C}$  e, na tabela 2, para a temperatura de  $84^\circ\text{C}$ , que houve uma diminuição da micro-rugosidade quando a concentração volumétrica de  $\text{NH}_4\text{OH}$  passou de 1 para 0,25. Verificou-se também a ocorrência de crescimento de um óxido nativo cuja espessura resultou aproximadamente  $5\text{nm}$  para todas as amostras, de acordo com medidas de elipsometria para índice de refração fixo de 1,465. Esse óxido nativo, embora extremamente fino pode ser efeito substancial sobre a rugosidade do silício.

Assim, na seqüência do estudo, submetemos essas amostras processadas nas diferentes soluções baseadas em  $\text{NH}_4\text{OH}$ , nas temperaturas de  $71^\circ$  e  $84^\circ\text{C}$ , a uma etapa em solução de  $1\text{HF} : 40\text{H}_2\text{O}$  por 30 segundos em temperatura ambiente, seguido de enxágüe em água DI por 60 segundos. Com esse procedimento removemos totalmente qualquer óxido nativo que porventura crescesse na superfície de nossas amostras e que possa ter mascarado a real rugosidade superficial do silício observada pela técnica AFM. Em seguida, essas amostras foram levadas individualmente ao equipamento de AFM e foram imediatamente medidas. Os novos resultados obtidos são apresentados nas tabelas 3 e 4.

Comparando a evolução dos dados apresentados nas tabelas 1 e 2 com 3 e 4 observamos que a etapa posterior em HF fez reduzir a micro-rugosidade. Isto se deveu a retirada de uma camada de óxido nativo cujas características superficiais são mais irregulares do que o silício puro. A etapa de HF foi eficiente na retirada desse óxido, assim como aponta a litera-

tura, tendo em vista a observação da superfície hidrofóbica ao final dessa etapa[16]. Ao mesmo tempo, a concentração diluída de HF utilizada não promove danos a superfície da lâmina [16]. Além disso, o tempo máximo de 5 minutos entre o final do “dip” em solução de HF e a realização da medida de AFM garante uma superfície praticamente livre de óxido nativo[16].

Tabela 3 – Micro-rugosidade superficial obtida por técnica AFM para soluções com diferentes concentrações de  $\text{NH}_4\text{OH}$  a  $71^\circ\text{C}$ . Note que “r+” indica a amostra padrão seguida de “dip” por 30 segundos em solução de HF.

Varredura de $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$	RMS (nm)	Ra (nm)	$R_{\text{max}}$ PP (nm)
r+	0,068	0,054	0,607
$4\text{H}_2\text{O}:1\text{H}_2\text{O}_2:0,25\text{NH}_4\text{OH}$	0,069	0,054	0,616
$4\text{H}_2\text{O}:1\text{H}_2\text{O}_2:1\text{NH}_4\text{OH}$	0,068	0,054	0,601
$4\text{H}_2\text{O}:1\text{H}_2\text{O}_2:2\text{NH}_4\text{OH}$	0,062	0,050	0,539
$4\text{H}_2\text{O}:1\text{H}_2\text{O}_2:5\text{NH}_4\text{OH}$	0,072	0,057	0,834

Tabela 4 – Micro-rugosidade superficial obtida por técnica AFM para soluções com diferentes concentrações de  $\text{NH}_4\text{OH}$  a  $84^\circ\text{C}$ . Note que “r+” indica a amostra padrão seguida de “dip” por 30 segundos em solução de HF.

Varredura de $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$	RMS (nm)	Ra (nm)	Rmax PP (nm)
r+	0,068	0,054	0,607
$4\text{H}_2\text{O}:1\text{H}_2\text{O}_2:0,25\text{NH}_4\text{OH}$	0,075	0,058	1,164
$4\text{H}_2\text{O}:1\text{H}_2\text{O}_2:1\text{NH}_4\text{OH}$	0,068	0,054	0,637
$4\text{H}_2\text{O}:1\text{H}_2\text{O}_2:2\text{NH}_4\text{OH}$	0,065	0,051	0,560
$4\text{H}_2\text{O}:1\text{H}_2\text{O}_2:5\text{NH}_4\text{OH}$	0,065	0,052	0,552

É fato bem conhecido da literatura que a imersão rápida em solução de ácido fluorídrico diluída não altera substancialmente a micro-rugosidade da superfície de lâminas de silício<sup>16</sup>. Note que o parâmetro RMS é que reflete mais diretamente o desvio padrão da micro-rugosidade superficial enquanto que a varredura de  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$  é adequada uma vez que corresponde a uma área suficientemente grande para ser estatisticamente representativa. Os valores de rugosidade média ( $R_a$ ) medidos podem ainda ser comparados com resultados apresentados na literatura. Abe et al.[17] Apresentaram valores de  $R_a$  da ordem de 0,08nm para lâminas submetidas a polimento mecânico-químico balanceado (equivalente ao processo utilizado nas lâminas tipo prime). Tal resultado foi obtido também por AFM em varreduras de  $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$  [17]. Além disso, Pidduck apresentou micro-rugosidades RMS superficiais de lâminas polidas em torno de 0,1nm [18].

Na figura 1 temos imagens em três dimensões para o caso de amostra padrão (lâmina virgem sem qualquer tratamento, r+) em varredura de  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ . Note neste caso, que a remoção do óxido nativo resulta em menor rugosidade.

A figura 2 ilustra imagens de amostras submetidas as soluções 1, 2 e 4 ( $84^\circ\text{C}$ ) em varreduras de  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ , enquanto que a figura 3 ilustra as imagens para as mesmas amostras submetidas as soluções 1, 2 e 4 ( $84^\circ\text{C}$ ), também em varreduras de  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ , mas após a remoção do óxido nativo. Percebe-se claramente uma redução na rugosidade após a etapa em solução diluída de HF.

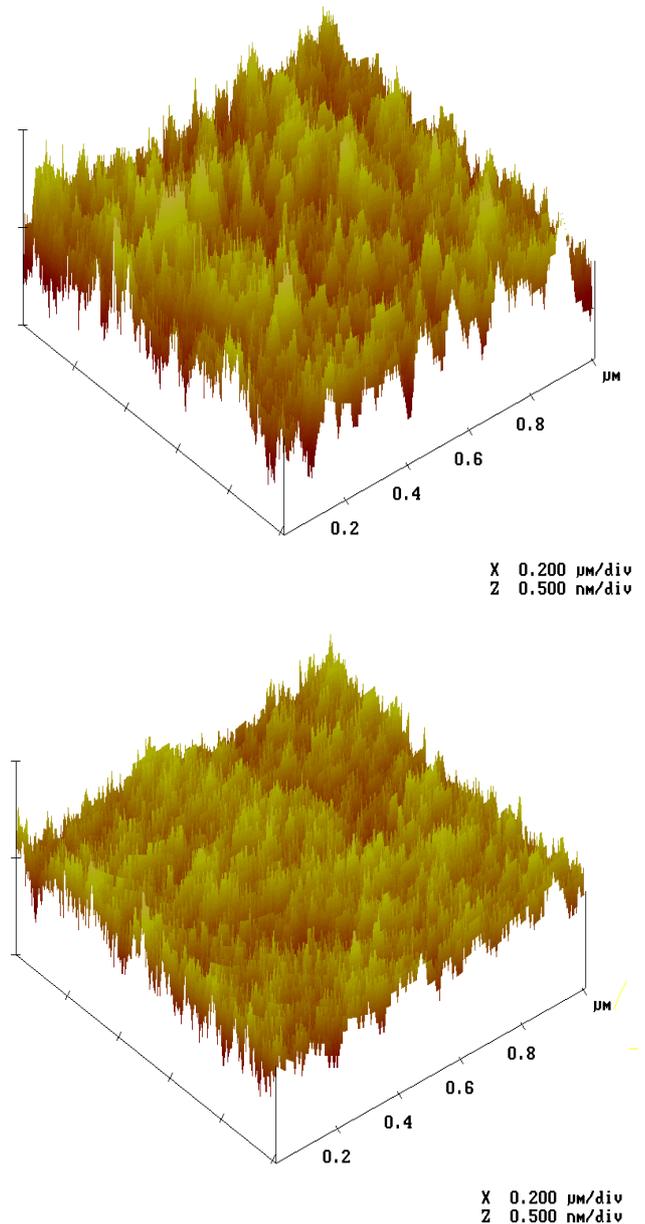
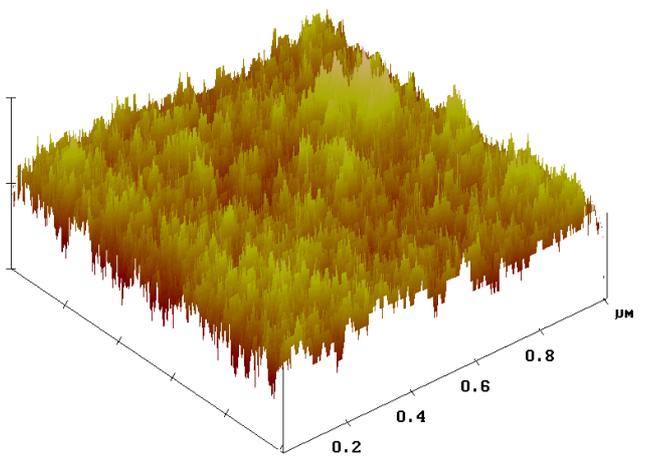


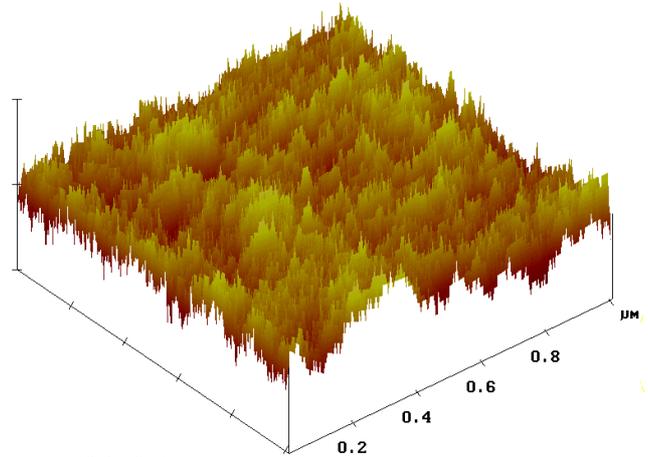
Figura 1. Imagens em três dimensões obtidas por técnica AFM onde vemos as superfícies de duas amostras em varredura de  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ . A primeira corresponde a uma lâmina virgem sem tratamento algum enquanto que a segunda foi tratada com dip em solução diluída de HF.

Na figura 4 temos um gráfico que mostra a evolução da rugosidade RMS para as diferentes amostras (amostra padrão e amostras submetidas as diferentes soluções) para as duas temperaturas testadas. Note que as amostras foram submetidas apenas aos enxágües e as soluções baseadas em  $\text{NH}_4\text{OH}$ .



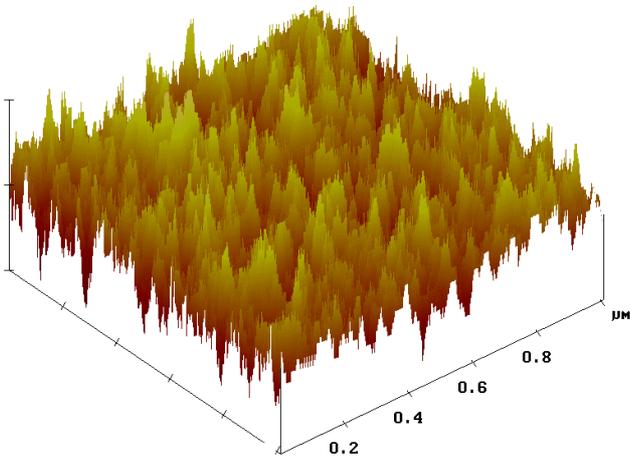
Solução 1  
4H<sub>2</sub>O:1H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:0,25NH<sub>4</sub>OH

X 0.200 μm/div  
Z 0.500 nm/div



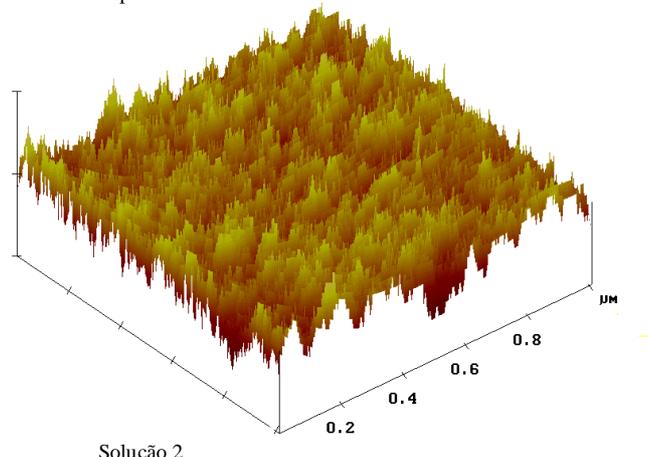
Solução 1  
4H<sub>2</sub>O:1H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:0,25NH<sub>4</sub>OH  
+dip HF

X 0.200 μm/div  
Z 0.500 nm/div



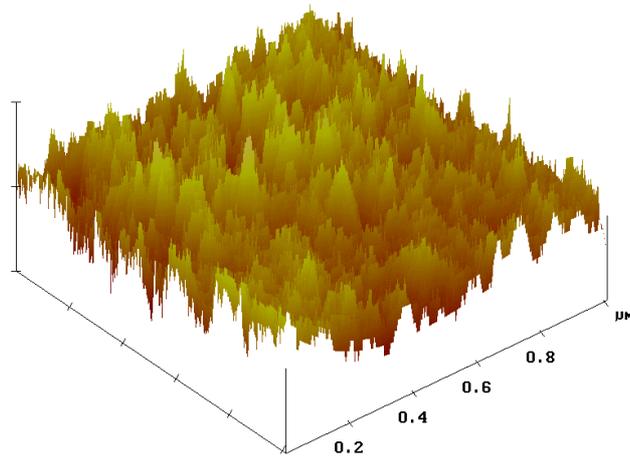
Solução 2  
4H<sub>2</sub>O:1H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:1NH<sub>4</sub>OH

X 0.200 μm/div  
Z 0.500 nm/div



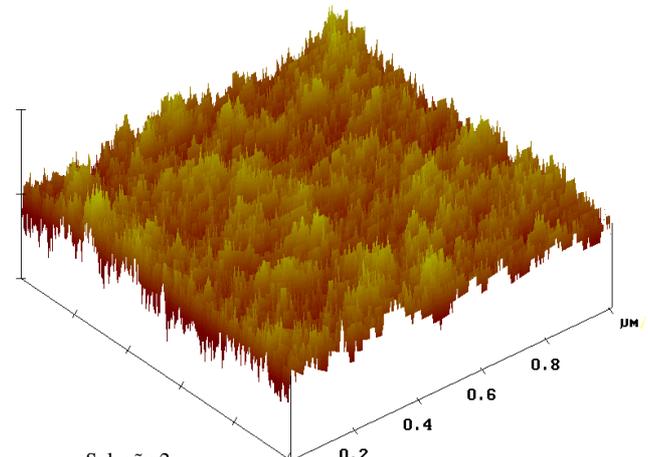
Solução 2  
4H<sub>2</sub>O:1H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:2NH<sub>4</sub>OH  
+dip HF

X 0.200 μm/div  
Z 0.500 nm/div



Solução 4  
4H<sub>2</sub>O:1H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:5NH<sub>4</sub>OH

X 0.200 μm/div  
Z 0.500 nm/div



Solução 2  
4H<sub>2</sub>O:1H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:5NH<sub>4</sub>OH  
+dip HF

X 0.200 μm/div  
Z 0.500 nm/div

Figura 2. Imagens em três dimensões obtidas por técnica AFM onde vemos as superfícies de amostras submetidas as soluções 1, 2 e 4 (84°C), respectivamente (área de varredura de 1μm x 1μm).

Figura 3. Imagens em três dimensões obtidas por técnica AFM onde vemos as superfícies de amostras submetidas as soluções 1, 2 e 4 (84°C), respectivamente. Seguido de dip em solução diluída de HF. Note que a área de varredura é de 1μmx1μm.

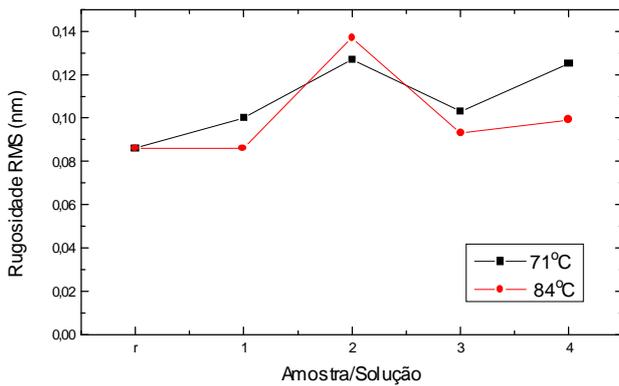


Figura 4. Evolução da rugosidade RMS obtida por AFM para as diferentes soluções SC1, além da amostra padrão.

Na figura 5 temos um gráfico que mostra a evolução da rugosidade RMS para as diferentes amostras (amostra padrão e amostras submetidas às diferentes soluções) para as duas temperaturas testadas. Note que as amostras foram submetidas a um dip final em solução de HF.

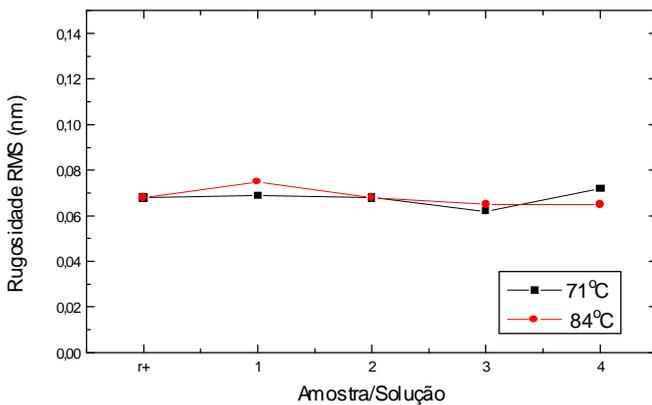


Figura 5. Evolução da rugosidade RMS obtida por AFM para as diferentes soluções, baseadas em NH<sub>4</sub>OH, além da amostra padrão. Sendo que todas foram submetidas a um posterior dip em solução de HF seguido de enxágüe em água DI.

Observando os resultados apresentados nas figuras 4 e 5 notamos uma sensível redução na micro-rugosidade superficial após a remoção do óxido nativo. Em particular, na figura 4, observou-se a tendência de maior rugosidade para temperatura de 71°C.

No segundo conjunto de experimentos, uma lâmina foi clivada em quatro partes e esses novos pedaços foram submetidas a 4 formulações de uma segunda solução de limpeza baseada em HF/HNO<sub>3</sub>. As amostras foram individualmente submetidas às soluções 5, 6, 7 e 8 por 15 minutos, seguido de enxágüe em água DI por 5 minutos e secagem em jato de nitrogênio.

Da mesma forma que as primeiras amostras, essas também foram acondicionadas em porta amostras de vidro devidamente limpo e mantidas no interior da sala limpa até o momento das análises de microscopia de força atômica. Na tabela 5 temos os resultados de micro-rugosidade superficial

para as diferentes soluções estudadas na varredura de 1µm x 1µm.

Tabela 5 – Micro-rugosidade superficial obtida por técnica AFM para soluções com diferentes concentrações de HNO<sub>3</sub> a Temperatura ambiente.

Varredura de 1µm x 1µm	R <sub>RMS</sub> (nm)	R <sub>a</sub> (nm)	R <sub>max</sub> PP (nm)
r+	0,068	0,054	0,607
20H <sub>2</sub> O : 1HF : 5HNO <sub>3</sub>	0,081	0,049	1,372
20H <sub>2</sub> O : 1HF : 2HNO <sub>3</sub>	0,100	0,055	1,871
20H <sub>2</sub> O : 1HF : 1HNO <sub>3</sub>	0,057	0,043	0,738
20H <sub>2</sub> O : 1HF : 0,25HNO <sub>3</sub>	0,062	0,038	0,960

Nos dados apresentados na tabela 5 podemos observar, uma relação entre a concentração do HNO<sub>3</sub> e a rugosidade RMS medida. Considerando a rugosidade RMS, observamos uma sensível queda desse parâmetro nas amostras submetidas às soluções 7 e 8.

A redução da rugosidade está associada à menor concentração do HNO<sub>3</sub>. A literatura reporta que o HNO<sub>3</sub> atua oxidando a superfície da lâmina de silício enquanto o HF atua removendo o óxido formado<sup>13</sup>. Dessa forma, o menor ataque pelo HNO<sub>3</sub>, não apenas resulta em menor rugosidade, mas também promoveu redução da rugosidade em relação a lâmina de referência.

Além disso os resultados apresentados estão próximos dos obtidos por Abe et al.<sup>17</sup> de aproximadamente 0,08nm para R<sub>a</sub> e os obtidos por Pidduck et al.<sup>18</sup> de aproximadamente 0,1nm.

As figuras 6 e 7 apresentam imagens em três dimensões, obtidas por AFM para os casos extremos (amostras submetidas às soluções 5 e 8) na varredura de 1µm x 1µm.

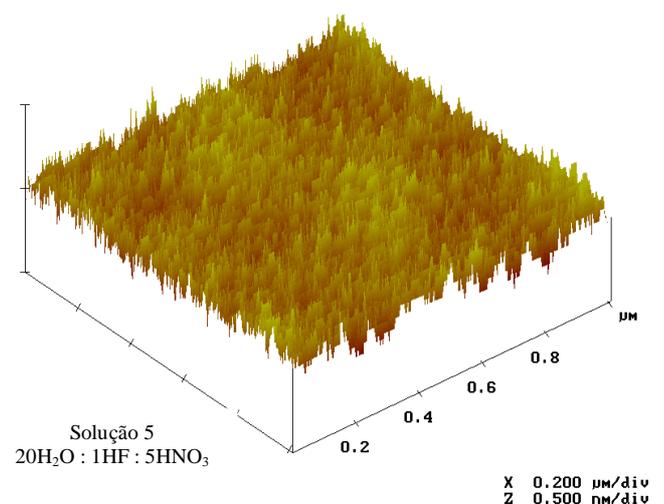


Figura 6. Imagem em três dimensões obtidas por técnica AFM onde vemos a superfície da amostra submetida a solução 5, em varredura de 1µm x 1µm.

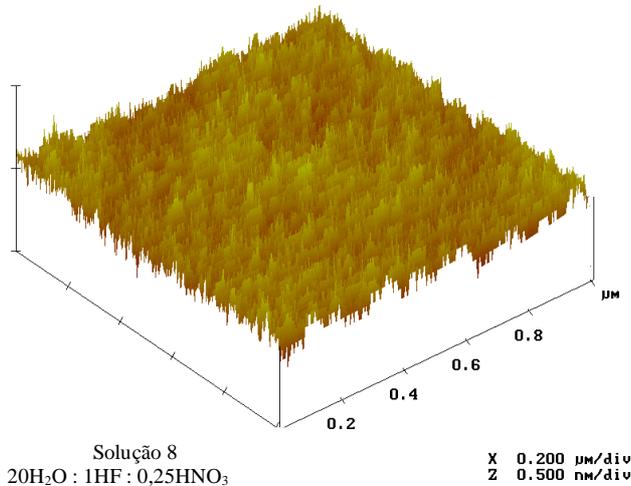


Figura 7. Imagem em três dimensões obtidas por técnica AFM onde vemos a superfície da amostra submetida a solução 8, em varredura de 1µm x 1µm.

Da comparação qualitativa das figuras 6 e 7, fica clara a menor micro-rugosidade superficial para a amostra submetida à solução 8.

#### 4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foram estudadas duas soluções normalmente empregadas em limpeza de lâminas de silício. Para o caso da solução  $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$  foi observada na temperatura de  $84^\circ\text{C}$ , a tendência esperada de quanto menor a concentração do agente  $\text{NH}_4\text{OH}$  menor a agressão sofrida pela superfície da lâmina. Para o caso da solução  $\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$  foi observada de uma forma clara que a concentração do agente  $\text{HNO}_3$  está diretamente relacionada com a rugosidade superficial observada e que quanto menor for sua concentração menor será a agressão à superfície da lâmina de silício.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo suporte financeiro.

#### REFERÊNCIAS

1. Dennard, R. H., "Design of Ion-Implanted MOSFET's With Very Small Physical Dimensions." IEEE J. of Solid State Circuits, V. 98, n.5, 256 (1974).

2. Nogueira, W. A.; dos Santos Filho, S.G., "Partial Dielectric Breakdown in MOS Gate Oxides Grown by RTO", International Conference on Microelectronics and Packaging, 298-302 (2000).

3. Chen, I. C.; Holland, S. E. and Hu, C. M., "Electrical Breakdown in Thin Gate and Tunneling Oxides", IEEE Trans. On Electron Devices, Vol. ED-32, n. 2, 413-422 (1985).

4. Falster, R., "The Phenomenology of Dielectric Breakdown in Thin Silicon Dioxide Films: Al Cathodes and p-Type Si Anodes", J. Appl. Phys. V. 66, n. 7, 3355-3370 (1989).

5. Olivo, P.; Nhuyen, T. N. and Riccò, B., "Hith\_Field-Induced Degradation in Ultra-Thin  $\text{SiO}_2$  Films". IEEE Trans. On Electron Devices, V.35, n 12, 2259-2267 (1988).

6. Lisboa, M. O. P.; Ravirez-Fernandes, F. J., "Mecanismos de Falha em Óxidos de Silício e Junções PN Dependentes da Solicitação Elétrica", Anais do 10º CBECIMAT, Águas de Lindóia, SP, 1057-1060, (1992).

7. Lei, T.F. et al. "Characterization of Polysilicon Oxides Thermally Grown and Deposited on Electronic Roughness". IEEE Trans. On Electron Devices, V. 45, n. 4, 912-917 (1998).

8. dos Santos, S. G.; Hasenack, C.;Lopes, M. C. V. et al. "Rapid Thermal Oxidation of Silicon With Different Thermal Annealing Cycles in Nitrogen: Influence on Surface Microroughness and Electrical Characteristics", Semiconductor Science and Technology, v.10, 990-996 (1995).

9. Klein, N.; Nevanlinna, O. "Lowering of The Breakdown Voltage of Silicon Dioxide by Asperities and Spherical Electrodes". Solid State Electronics, V. 20, n.9, 883, (1983).

10. Lopes M.C.V.; dos Santos S.G.; Hasenack C.M.; et al., "Si-SiO<sub>2</sub> electronic interface roughness as a consequence of Si-SiO<sub>2</sub> topographic interface roughness". J. Electrochem. Soc. 143: (3) 1021-1025 (1996).

11. Knotter, D. M.; Gendt, S.; Mertens, P. W.; Heyns, M. M.; "Silicon Surface Roughening Mechanisms in Ammonia Hydrogen Peroxide Mixtures", J. Electrochem. Soc. 147 (2) 736-740 (2000).

12. Meuris, M.; Verhaverbeke, S.; Mertens, P.W.; et al; "The Relationship of the Silicon Surface Roughness and Gate Oxide Integrity in  $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2$  Mixtures", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.31 (1992), L1514-1517, part 2, n. 11A, November (1992).

13. Ghandhi, Sorab Khushro, "VLSI fabrication principles :silicon and gallium arsenide", New York : Wiley, c1983.

14. Kern, W. "The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology" RCA, V. 31, 187 (1970).

15. AFM/LFM Scanning Probe Microscope Instruction Manual. Digital Instruments Inc., 1997. Digital Instruments, Incorporated 112 Robin Hill Road. Santa Barbara, California 93117. United States of America.

16. Ohmi, T.; Myashita, M.; Itano, M.; et al; "Dependence of Thin-Oxide Films Quality on Surface Microroughness", IEEE Trans. On Electron Devices, V. 39, n. 3, 537-545 (1992).

17. Abe T; Steigmeier E. F; Hagleitner W; Pidduck A.J.; "Microroughness Measurements on Polished Silicon-Wafers", Jpn. Journal of Appl. Phys., part 1, 31(3) 721-728 Mar 1992.

18. Pidduck A. J.; Smout A.B.J., Wagner P.; et al.: "Measurement of Silicon Wafer Roughness by Atomic Force Microscopy: An Interlaboratory Comparison", Microscopy of Semiconducting Materials, 1997 (157) 601-606.