

# NUCLEAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE NANOTRINCAS EM Si (001) CO-IMPLANTADO COM H<sup>+</sup> e He<sup>+</sup><sup>1</sup>

Shay Reboh<sup>2</sup>  
Augusto. A. D. de Mattos<sup>3</sup>  
Tatiana Lisboa Marcondes<sup>3</sup>  
Francis Rossato<sup>4</sup>  
Fabiola Campos<sup>4</sup>  
Yonathan Reboh<sup>5</sup>  
Paulo F. P. fichtner<sup>4</sup>

## Resumo

Em combinação com a técnica de colagem direta, o corte iônico expande as possibilidades de produção de heteroestruturas de alta qualidade permitindo a transferência de finas camadas monocristalinas de um substrato a outro. No presente trabalho, estudamos o processo de corte iônico em laminas de Si (001) através da co-implantação íons de H<sub>2</sub><sup>+</sup> e He<sup>+</sup> nas fluências de 0.5 to 2.5x10<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup> por íon e energias calculadas to de forma a produzir a mesma profundidade média de implantação de 1.5 µm para ambos os íons. Amostras tratadas termicamente (temperatures d 350 à 700°C por t=1800s) foram caracterizadas por microscopia ótica, e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados são apresentados e discutidos em termos da distribuição de tamanho de esfoliação individual e áreas totais de esfoliação. Demonstramos que os parâmetros de implantação podem ser otimizados de maneira a se obter áreas de esfoliação em larga escala. Em particular, a corrente de implantação tem uma influencia determinante nos resultados. Uma maior corrente leva a uma área maior de esfoliação. E por fim, em contraste com o conceito de coalescência de microcavidades encontrado na literatura, encontramos uma condição específica em que ocorre uma propagação instável de trinca nucleada em um único ponto resultando em uma inteira esfoliação de até mesmo relativamente finas camadas de Si.

**Palavras-chave:** Silício; Corte iônico; Nanotrínca; Implantação iônica.

## NANOCRACK NUCLEATION AND PROPAGATION IN SI CO-IMPLANTED WITH H<sup>+</sup> E HE<sup>+</sup>

### Abstract

In combination with the wafer bonding technique, the ion cut process expands the possibility of high quality heterostructures production, permitting the transfer of a thin layer to a substrate. On the present work, we study the ion cut process in (001) Si wafers co-implanted with H<sub>2</sub><sup>+</sup> e He<sup>+</sup> ions, on the fluencies of 0.5 to 2.5x10<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup> per ion and energies calculated to produce the same depth of implantation of 1.5 µm for both ions. Annealed samples (350°C to 700°C for t=1800s) were characterized by optical microscopy and scanning electron microscopy. The results are presented and discussed in terms of blister mean size and total exfoliation area of the samples. We demonstrate that the implantation parameters can be optimized to obtain large scale exfoliation. In particular, the implantation current looks to be the key factor on the results. A high current leads to a larger exfoliation area. And also, in contrast with coalescence process found on the literature, we achieved a specific condition were an instable crack propagation occurs from a single nucleation point, resulting in a total exfoliation area of the sample, even from a relative thin layers.

**Key words:** Silicon; Ion cut; Nanocrack; Ion implantation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> PGCIMAT – UFRGS

<sup>3</sup> PGMICRO – UFRGS

<sup>4</sup> Laboratório de Implantação Iônica- UFRGS

<sup>5</sup> Laboratório de Metalurgia Física- UFRGS

## INTRODUÇÃO

Recentemente um processo de esfoliação controlada ou corte iônico tem sido utilizado na indústria de semicondutores para obter a delaminação de uma fina lâmina de um substrato monocristalino.<sup>(1)</sup> Aplicado primeiramente na produção de substratos SOI, o método consiste na colagem direta de dois wafers de Si, seguida de separação de uma lâmina fina de um dos dois wafers colados. O método utiliza a implantação de gases, mais comumente H<sup>+</sup>, como um elemento de corte atômico em Si. Íons de H<sup>+</sup> quando implantados a uma dose adequada, produzem finas microcavidades na rede cristalina do Si. Alguns íons de H<sup>+</sup> aderem às ligações pendentes no Si enquanto outros íons enchem tais microcavidades. Se este sistema é aquecido a temperaturas de 400–500 °C, mais gás segrega para dentro das cavidades e a pressão interna cresce a ponto de deformar e fraturar o material, e a superfície do Si apresenta embolhamento e esfoliação localizada. Para muito altas doses de implantação o efeito de esfoliação pode ocorrer sem mesmo tratamento térmico. O brilhantismo da invenção do corte iônico está na percepção de que este efeito poderia ser utilizado para obtenção de um plano de fragilização no material, levando a um corte preciso na rede cristalina. O ponto chave para método foi a introdução de um substrato colado (ligado quimicamente) à superfície livre, que tem a função de prevenir o embolhamento e a esfoliação e redirecionar a pressão crescente nas microcavidades nas direções laterais.<sup>(2)</sup>

O princípio da técnica é apropriado a diferentes tipos de aplicação mas tem encontrado sua mais importante aplicação na produção de substratos SOI. Substratos SOI tem sido um ponto chave ao desenvolvimento de eletrônica de baixo consumo de energia e baixa voltagem, sendo um dos avanços mais importantes ao desenvolvimento de ULSI.<sup>(3-4)</sup>

Neste trabalho são apresentados resultados de estudos de esfoliação para a co-implantação de H<sup>+</sup> e He<sup>+</sup> em Si (001), que em comparação com implantações de H<sup>+</sup>, reduz significativamente a dose total necessária ao processo de corte.<sup>(7,8)</sup> Também é discutida a existência de um mecanismo de corte concorrente ao processo geralmente aceito, em que a clivagem induzida termicamente ocorre através de um processo de coalescência das microcavidades ou crescimento competitivo (oswald ripening).<sup>(2)</sup> Sob condições específicas apresentamos um comportamento não usual do sistema. A presença do substrato de ancoramento obtida por colagem direta necessária a ocorrência da separação completa do material também é discutida.

## MATERIAIS E MÉTODOS

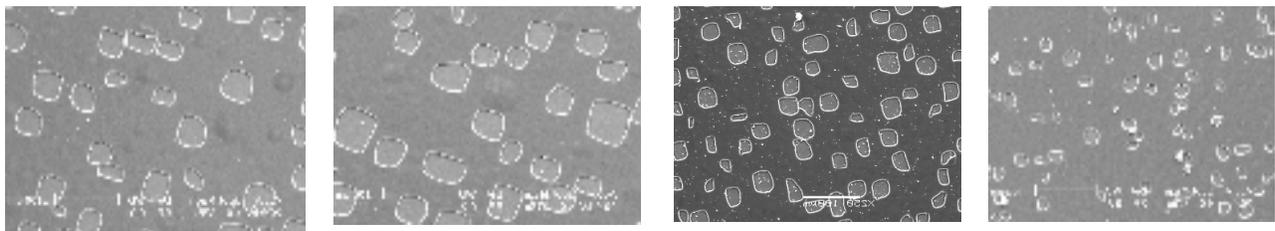
Para o presente estudo, foram utilizadas lâminas de Si CZ–Si <100> tipo-p com resistividade entre 1–20 Ωcm, co-implantadas com H<sub>2</sub><sup>+</sup> e He<sup>+</sup> com energias de 336 e 345 keV, respectivamente, e fluências entre 0.5 to 2.5 10<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup> por íon utilizando uma corrente de feixe entre 0.5 to 1.2 A/cm<sup>-2</sup>. As energias de implantação foram ajustadas utilizando o programa SRIM, de forma a produzir a mesma profundidade média de implantação de 1.5 μm para ambos os íons. As implantações foram realizadas com as amostras a 7° de inclinação com o eixo normal à temperatura ambiente. As amostras foram partidas em pedaços menores e tratadas termicamente em alto vácuo diretamente a temperaturas entre 350°C a 700°C por 1800s e foi realizado também um

tratamento térmico em duas etapas, primeiramente a 350°C por 1800s seguido de 700°C por 1800s. As amostras foram analisadas por microscopia ótica, microscopia de eletrônica de varredura e microscopia eletrônica de transmissão.

As áreas percentuais de esfoliação assim como os tamanhos médios de esfoliação foram estimadas computacionalmente a partir de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

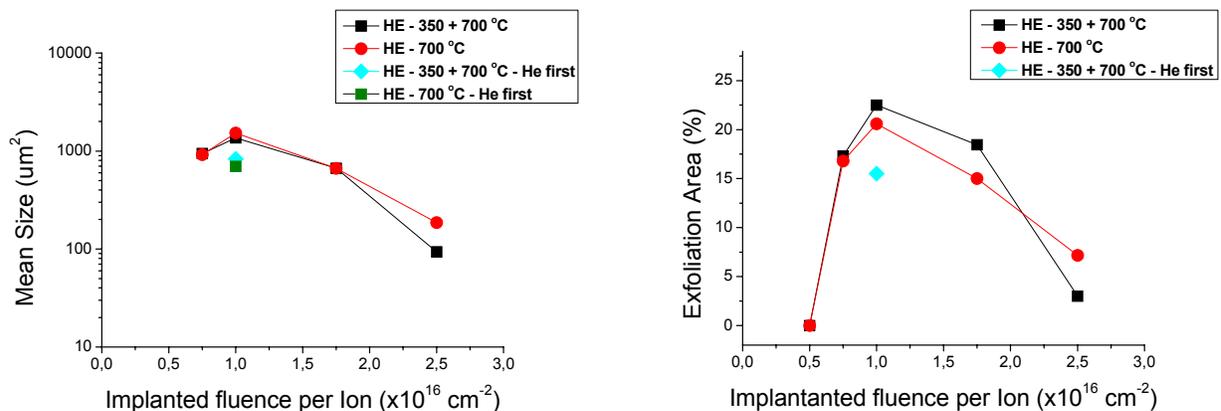
## RESULTADOS

A Figura 1 mostra o típico aspecto de esfoliação e embolhamento observados por MEV de amostras tratadas termicamente a 700°C for 1800 s. Observamos a esfoliação localizada como um descascamento na superfície do Si.



**Figura 1.** Aspecto de esfoliação observados por Mev para as fluências de 0,75, 1,0, 1,75 e 2,5 x 10<sup>16</sup> íons/cm<sup>2</sup> respectivamente.

Fica claro que o tamanho individual das áreas esfoliadas assim como a densidade varia com a fluência implantada. Os gráficos da Figura 2 resumem os principais resultados obtidos por MEV compilados em termos de área total de esfoliação  $A_{\text{exf}}$  e tamanho médio de esfoliação individual  $A_{\text{mean}}$  para amostras implantadas primeiramente com íons H<sub>2</sub><sup>+</sup> seguidos de He<sup>+</sup> e considerando uma média corrente de cerca de  $\approx 0.5 \mu\text{A cm}^{-2}$  e para ambas as condições de tratamentos térmicos (350+700°C e diretamente a 700°C). Fica evidente que um máximo de  $A_{\text{exf}}$  ocorre para fluências em torno de  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  (Figura 2b). O mesmo ocorre para os valores de  $A_{\text{mean}}$  (Figura 2a).



**Figura 2.** Tamanhos médios individuais de esfoliação 2a,e 2b áreas totais de esfoliação em função das fluências implantadas.

Nesta região de ótimo da curva a figura também mostra que revertendo a ordem de implantação (primeiramente He), os valores correspondentes de  $A_{\text{exf}}$  e  $A_{\text{mean}}$  são em torno de 30 a 40% menores. Observa-se que para muito baixa fluência e para uma alta fluência, as áreas de esfoliação e os tamanhos médios decrescem. Finalmente, para o caso de ótimo da curva, levando-se em consideração a dose total de gás implantado foi testada uma variação da relação de H/He de originalmente 2/1 para 1/1, assim como a influência da corrente de implantação no processo. Neste caso, foi utilizada uma baixa corrente de  $0,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  e uma alta corrente de  $1,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Foram realizados diversos tratamentos térmicos a vácuo entre 350 a 550°C, e os resultados são apresentados abaixo em termos do que foi observado por microscopia ótica.

**Am 1–**  $\text{H}_2^+$  336keV  $1 \times 10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup>      **0,25  $\mu\text{A}$**   
 $\text{He}^+$  345keV  $2 \times 10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup>      **0,25  $\mu\text{A}$**

350 <sup>0</sup> C	Sem esfoliação
400 <sup>0</sup> C	Pouco esfoliação
450 <sup>0</sup> C	Bastante esfoliação
500 <sup>0</sup> C	Bastante esfoliação

**Am 2–**  $\text{H}_2^+$  336keV  $1 \times 10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup>      **1,2  $\mu\text{A}$**   
 $\text{He}^+$  345keV  $2 \times 10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup>      **1,2  $\mu\text{A}$**

400 <sup>0</sup> C	Sem esfoliação
450 <sup>0</sup> C	<b>Esfoliação total</b>
500 <sup>0</sup> C	<b>Esfoliação total</b>
550 <sup>0</sup> C	<b>Esfoliação total</b>

## DISCUSSÃO

A partir das imagens da Figura 1 e dos gráficos da Figura 2, observamos que tanto para uma baixa como para uma alta fluência, os resultados de área total de esfoliação decrescem. Em uma primeira aproximação é usualmente considerado que, durante a implantação e tratamento térmico, He difunde e é aprisionado nas cavidades formadas e preenchidas pelo hidrogênio, causando um aumento da pressão interna e induzindo a quebra de ligações Si-H<sup>(5,6)</sup> e formação de H<sub>2</sub> molecular, favorecendo o processo de esfoliação ou de propagação de trinca. Para uma baixa dose, a quantidade de gás presente não exerce a pressão suficiente para causar esfoliação. Para uma alta dose o que ocorre é a formação de bolhas esféricas de He que não são efetivas no processo de esfoliação. Sendo assim, a quantidade de He aprisionado nas bolhas esféricas não estará contribuindo com pressão nas cavidades planares formadas pelo hidrogênio, diminuindo a eficiência do processo.

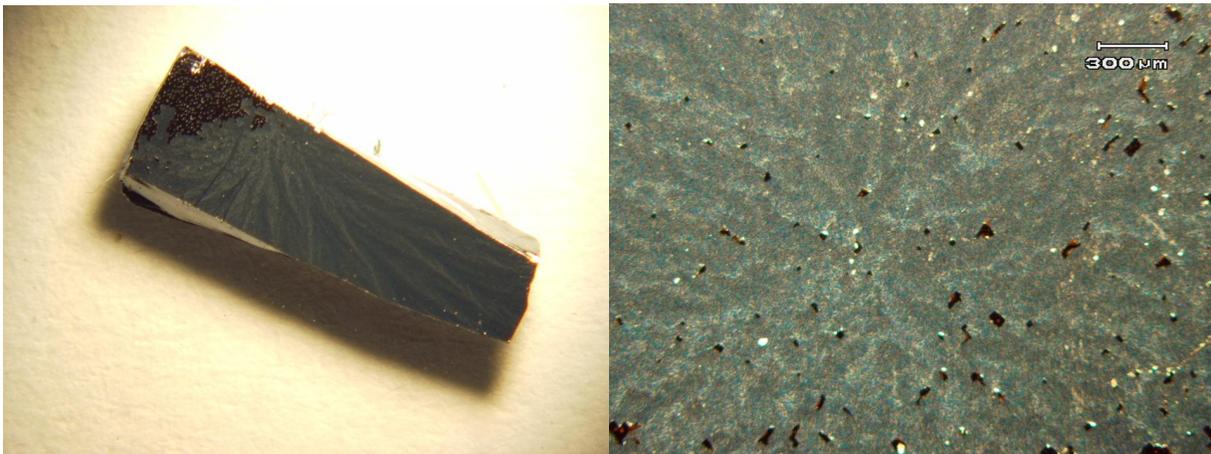
Observa-se no gráfico da Figura 2 uma região de dose total em que o processo é mais efetivo em esfoliação. Os melhores resultados foram obtidos com a implantação de H<sup>+</sup> primeiro, seguido de implantação de He.

Em uma análise mecânica do processo, Feng e Huang<sup>(9)</sup> propõe um modelo em que sendo H a espessura de camada definida pela energia de implantação e R o raio médio de uma microcavidade, temos dois regimes distintos de comportamento. O

primeiro regime, quando a razão  $H/R < 1$  favorece o processo de esfoliação localizada, e segundo regime ocorre quando a razão  $H/R > 1$ , favorecendo a propagação lateral do defeito. Nos casos apresentados na Figura 1 e no gráfico da Figura 2, obteve-se para o caso de máximo das curvas uma razão  $H/R$  de aproximadamente 0,14, indicando que a força vertical é grande em relação a resistência de camada de Si e ocasionando esfoliação localizada, fica assim clara a concordância com a teoria proposta.

Nesta mesma faixa de fluências onde obtemos os melhores resultados de área total de esfoliação, realizamos um estudo mais detalhado, modificando a razão de gás H/He para 1/1 e testando dois casos de corrente de implantação. Um caso de baixa corrente de  $0,25 \mu\text{A}$  e um caso de alta corrente de  $1,2 \mu\text{A}$  como está mostrado nos resultados apresentados.

O que se observou foi um comportamento altamente dependente da corrente. Para o caso de baixa corrente (ver resultados am1), as áreas de esfoliação permaneceram da mesma ordem de grandeza das apresentadas nas Figuras 1 e 2, enquanto que para o caso de alta corrente (ver resultados am2) o que se observou foi a esfoliação total da camada para temperaturas de recozimento iguais ou acima de  $450^\circ\text{C}$ . A amostra 3. Apesar de nos encontrarmos ainda numa condição de superfície livre, ou seja, sem um substrato de ancoramento que empeça a esfoliação localizada de ocorrer e favorecendo a propagação lateral das cavidades, o que observamos foi um processo de nucleação de trinca em um único ponto, o que fica evidente pela morfologia radial apresentada pelas amostras como se pode observar na Figura 4.



**Figura 4.** Esfoliação total com pequena área remanescente e textura radial observadas por microscopia ótica.

A textura é uma forte indicação de que o processo teve início em um ponto localizado da amostra expandindo-se por toda a sua extensão antes que o processo de esfoliação localizada tivesse ocorrido. No momento não temos uma explicação clara para o fenômeno. Acreditamos que devido a uma conjuntura de fatores termomecânicos, aliados a um efeito de espessura de camada acima da camada implantada, um único defeito (microcavidade) atinge um tamanho crítico rapidamente gerando uma propagação instável da trinca através da região de maior concentração de defeitos. Para uma completa compreensão do efeito, um estudo mais detalhado está sendo realizado. O que se pretende apresentar no presente trabalho é a existência de

um mecanismo de nucleação de trinca que tem início em um único ponto e leva a áreas de 100% de esfoliação, ao contrário do mecanismo geralmente aceito, em que a clivagem induzida termicamente ocorre através de um processo de coalescência das microcavidades ou crescimento competitivo (oswald ripening).<sup>(2)</sup>

## CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta um estudo sistemático sobre o comportamento de esfoliação de amostras de Si(001) co-implantadas com íons de  $H_2^+$  e  $He^+$ . Foi possível demonstrar que existe um intervalo de fluência onde os valores máximos de fração de área e área média de esfoliação correspondem ao critério de esfoliação localizada dado pela razão  $H/R \ll 1$  (ver discussões). Contudo, dentro deste mesmo intervalo, obtivemos uma condição específica em que se observa esfoliação total. Trata-se de fenômeno diferente do atualmente está descrito na literatura. Além disso, quando se obtém esfoliação total, observa-se a que o processo se desencadeia a partir de um único ponto central. Este processo compete com o de coalescência de microtrincas e, em condições específicas, termina dominando provavelmente por apresentar um comportamento cinético mais eficiente.

## REFERENCIAS

- 1 M. Bruel: Electron. Lett. 31 (1995) No. 14, 1201.
- 2 B. Aspar et al. / Microelectronic Engineering 36 (1997) 233-240
- 3 A.J. Auberton-Hervé, J.M. Lamure, T. Barge, M. Bruel, B. Aspar and J.L.Pelloie: Semicond. Int. 11 (1995) 97.
- 4 J.P. Colinge: Proc. Int. Electron. Device Meeting (1994) p. 817.
- 5 S. Romani and J.H. Evans, Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research B44, P. 313 (1990).
- 6 G.B. Anderson, C.C Tsai and R. Thompson, Mat. Res. Soc. vol.262, p.128.
- 7 A. Agarwal, T.E. Haynes, V.C. Venezia, O.W. Holland, D.J. Eaglesham, Appl. Phys. Lett. 72 (1998) 1086.
- 8 M.K. Weldon, M. Collot, Y.J. Chabal, V.C. Venezia, A. Agarwal, T.E. Haynes, D.J. Eaglesham, S.B. Christman, E.E. Chaban, Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 3721.
- 9 X.-Q. Feng, Y. Huang / International Journal of Solids and Structures 41 (2004) 4299–4320