

1. Classificação INPE-COM.4/RPE C.D.U.: 539.2		2. Período	4. Distribuição	
3. Palavras Chaves (selecionadas pelo autor) CONDUÇÃO BIDIMENSIONAL IMPLANTAÇÕES RASAS NO SILÍCIO			interna <input type="checkbox"/>	externa <input checked="" type="checkbox"/>
5. Relatório nº INPE-1872-RPE/217	6. Data Agosto, 1980		7. Revisado por <i>Parada</i> Irajá Newton Bandeira	
8. Título e Sub-Título CONDUÇÃO BIDIMENSIONAL EM IMPLANTAÇÕES RASAS NO SILÍCIO			9. Autorizado por <i>Parada</i> Nelson de Jesus Parada Diretor	
10. Setor DTE	Código		11. Nº de cópias 08	
12. A autoria E. Granato R. Ranvaud A. Ferreira da Silva I.C. da Cunha Lima J.P. de Souza			14. Nº de páginas 07	
13. Assinatura Responsável <i>[Assinatura]</i>			15. Preço	
16. Sumário/Notas <p>Efeitos bidimensionais vêm sendo estudados há vários anos em estruturas MOS, sobretudo na camada de inversão de elétrons no silício. A espessura da camada de elétrons, na superfície do silício (interface com o óxido), é da ordem de 100 Å. Por outro lado, a espessura das regiões implantadas com íons varia com a voltagem aceleradora, sendo possível atingir (no limite inferior) valores da ordem de 200 Å, no caso de implantação de Si com P. A densidade de cargas, na região dopada, pode ser escolhida a vontade, variando a dose de implantação, sendo que a barreira de potencial da junção segura cargas na camada superficial, mesmo quando ela for muito fina. É, então, possível criar uma estrutura eletrônica semelhante àquela encontrada num dispositivo MOS.</p>				
17. Observações Trabalho apresentado na 32ª Reunião Anual da SBPC e submetido para publicação na Revista Brasileira de Física				

## Condução Bidimensional em Implantações Rasas no Silício

E. GRANATO, R. RANVAUD, A. FERREIRA DA SILVA e I.C. DA CUNHA LIMA  
Instituto de Pesquisas Espaciais, INPE - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq - 12200 S.J. dos Campos, SP

J.P. DE SOUZA

Laboratório de Microeletrônica, Universidade de São Paulo, SP.

In the past several years much effort has gone into studying two dimensional effects in MOS (Metal Oxide Semiconductor) structures, particularly electron inversion layers in silicon. The thickness of the layer of electrons on the silicon surface is of the order of  $100 \text{ \AA}$ .

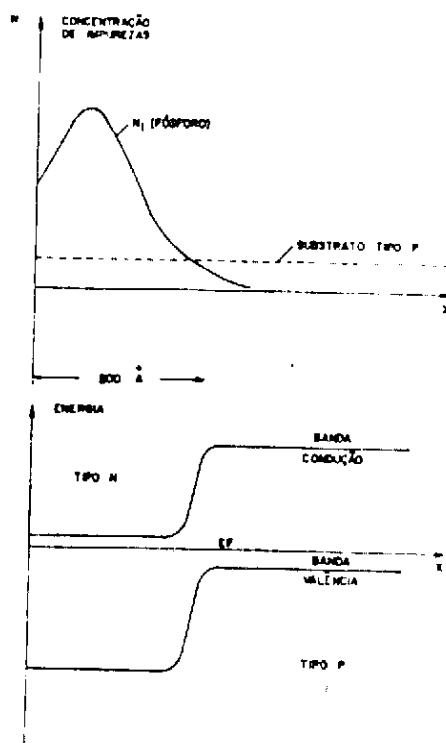
The thickness of ion implanted regions, on the other hand, varies with the accelerating voltage, its lower limit in the case of P in Si being about  $200 \text{ \AA}$ . The charge density in the implanted region can be chosen at will, varying the dose of the implant. The potential barrier associated with the junction keeps the charges near the surface. It is therefore possible to obtain a structure which is electronically similar to the one found in MOS devices.

Efeitos bidimensionais vêm sendo estudados há vários anos em estruturas MOS, sobretudo na camada de inversão de elétrons no silício. A espessura da camada de elétrons, na superfície do silício (interface com o óxido), é da ordem de  $100 \text{ \AA}$ . Por outro lado, a espessura das regiões implantadas com íons varia com a voltagem aceleradora, sendo possível atingir (no limite inferior) valores da ordem

de  $200 \text{ \AA}$ , no caso de implantação de Si com P. A densidade de cargas, na região dopada, pode ser escolhida a vontade, variando a dose de implantação, sendo que a barreira de potencial da junção segura cargas na camada superficial, mesmo quando ela for muito fina. É, então, possível criar uma estrutura eletrônica semelhante àquela encontrada num dispositivo MOS.

Utilizando-se uma energia da ordem de 12 keV foram implantados íons de fósforo no silício, numa camada de apenas  $180 \text{ \AA}$ . O perfil da concentração de impurezas ( $N_i$ ) de fósforo, obtido depois de um recozimento, está ilustrado na Figura 1a. Esse recozimento é necessário para reestabelecer a estrutura cristalina do silício, cuja superfície fica amorfa durante a implantação, e para que os átomos de fósforo ocupem posições que podem ser substituídas. Sendo que a espessura destas implantações são da ordem do comprimento de blindagem no substrato, é possível especular sobre a existência de efeitos bidimensionais nas propriedades elétricas das camadas implantadas, em analogia com o que acontece nas camadas de inversão e acumulação de estruturas MOS (Metal-Óxido-Semicondutor) Ref. 1.

Um diagrama de bandas, esquemático da situação nos dispositivos aqui considerados, é mostrado na Fig. 1b. Como a junção p-n fica perto da superfície, pode-se considerar que o campo elétrico, associado à junção, cria um poço de potencial quase quadrado, de uma largura de aproximadamente  $200 \text{ \AA}$ . Numa estrutura MOS, o poço de potencial é triangular, com os portadores restritos a uma camada da ordem de  $100 \text{ \AA}$ .



Figs. 1a e 1b.

A condução elétrica no silício dopado com fósforo (Si:P) pode ser feita por dois mecanismos:

- a) Em altas temperaturas, os níveis doadores serão ionizados, e haverá uma alta concentração de elétrons na banda de condução.
- b) Em baixas temperaturas, só poderá haver condução pela formação de uma banda de impureza, o que acontecerá quando a dopagem for suficientemente alta.

O caso a) pode ser estudado em grande detalhe com estruturas MOS, e uma grande variedade de fenômenos associados à bidimensionalidade do sistema tem sido observada experimentalmente (Ref. 2) e explicada teoricamente (Ref. 3) na literatura. Neste trabalho, considerou-se a possibilidade de formar uma banda de impureza em implantações suficientemente rasas para ser consideradas quase-bidimensionais.

Para esse fim, foi fabricado o dispositivo mostrado na Figura 2, em que duas regiões de implantação  $n^+$  (de  $^{31}\text{P}^+$ ) a 100 KeV ( $3 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ ) e seguida de uma a 30 keV ( $5 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ ) servem de contato entre as duas extremidades de uma implantação  $n$  (de  $^{31}\text{P}^+$ ) a 12 keV ( $10^{14}\text{cm}^{-2}$ ). O substrato é de silício do tipo p de resistividade  $6\Omega\text{cm}$ . As dimensões do dispositivo estão marcadas na Figura 2. Os contatos foram feitos por evaporação de alumínio, com um recozimento de  $450^\circ\text{C}$ ; 30 min., necessário por causa da formação de uma fina camada de óxido depois da implantação da região  $n^+$  e antes da evaporação do alumínio.

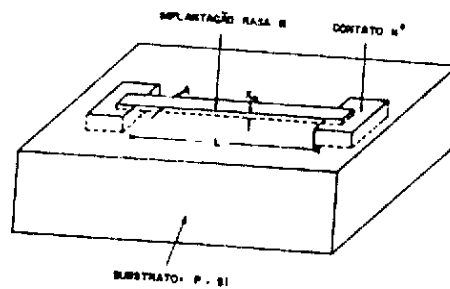


Fig. 2

A resistividade foi medida a várias temperaturas entre o ambiente e o nitrogênio líquido, cujos resultados estão mostrados na Figura 3 na forma de  $\ln\sigma$  em função de  $\frac{1}{T}$ . Claramente, a condutividade da amostra, com  $n = 1.0 \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ , é do tipo semiconductor, pois os pontos experimentais caem numa reta de inclinação negativa. Encontrou-se uma energia de ativação de 40 meV. Além disto, a resistividade da região implantada é cerca de duas vezes superior ao valor relativo ao "bulk" com a mesma concentração de impurezas.

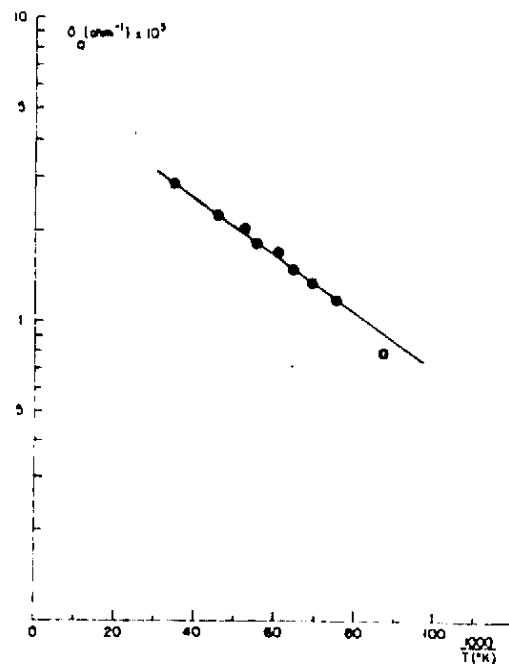


Fig. 3

A concentração crítica para o Si:P normal, em três dimensões, é ao redor de  $3.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  (Ref. 5). Uma dopagem de implantação de  $1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ , numa espessura de  $200 \text{ \AA}$ , por outro lado, implica uma concentração de P de  $5.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ .

Conclui-se que as dimensões da implantação são tais que implicam um comportamento diferente do "normal", e que a transição para uma fase metálica é suprimida ou deslocada para concentrações de mais de uma ordem de grandeza acima do caso tridimensional.

A condutividade, em função da dopagem, está sendo medida para determinar se existe uma quebra, como já foi observado em amostras volumétricas de Si:P (Ref. 4), citadas na literatura, perto de uma concentração crítica  $N_c$ , em que se forma uma banda de impureza, que dá origem a uma transição isolante-metal.

Estas conclusões são significativas no debate a respeito da existência ou não de estados deslocalizados em duas dimensões (Refs. 2 e 3).

## BIBLIOGRAFIA

1. Veja por exemplo, N. Mott, M. Pepper, S. Pollitt, R.H. Wallis and C.J. Adkins, Proc. Royal Soc. London A345, 169 (1975); C.J. Adkins, J. Phys. C11 851 (1978).
2. D.C. Tsui and S.J. Allen, Jr., Phys. Rev. Lett 32, 1200 (1974); N. Giordano, W. Gilson and D.E. Prober, Phys. Rev. Lett 43, 725 (1979). Veja também na Ref. 1.
3. K.E. Khor and P.V. Smith, J. Phys. C4, 2029 (1971); B.T. Debney, J. Phys. C10, 4719 (1977); K. Niizeki, Prog. Theor. Phys. 62, 1 (1979); P.A. Lee, Phys. Rev. Lett 42, 1492 (1979); E. Abrahams, P.W. Anderson, D.C. Licciardello and T.V. Rama Krishnan, Phys. Rev. Lett 42, 673 (1979).
4. C. Yamanonchi, K. Mizuguchi and W. Sasaki, J. Phys. Soc. Japan 22, 859 (1967); W. Sasaki, Proc. of the Int. Conference, Impurity Bands in Semiconductors, Würzburg-Germany, 264 (1979). Este comportamento da resistividade ( $\rho = \frac{1}{\sigma}$ ) no caso tridimensional é também verificado em outros semicondutores dopados. Veja por exemplo, K.A. Chao and A. Ferreira da Silva, J. Phys. C11, 3661 (1978); Int. J. Quantum Chem.: Quantum Chem. Sym. 12, 461 (1978) e A. Ferreira da Silva, J. Phys. C13, L427 (1980).
5. T.G. Castner, N.K. Lee, G.S. Cieloszyk and G.L. Dalinger, Phys. Rev. Lett. 34, 1627 (1975); N. Kobayashi, S. Ikehata, S. Kobayashi and W. Sasaki, Solid. St. Commun. 24, 67 (1977).