

1. Classificação <i>INPE-COM.4/RPE</i> <i>C.D.U.: 539.2</i>	2. Período	4. Distribuição interna <input type="checkbox"/> externa <input checked="" type="checkbox"/>
3. Palavras Chaves (selecionadas pelo autor) <i>SUB-BANDAS BIDIMENSIONAIS</i> <i>IMPLANTAÇÕES RASAS</i>		7. Revisado por <i>Hc</i> <i>Humberto Closs</i>
5. Relatório nº <i>INPE-2147-RPE/369</i>	6. Data <i>Junho, 1981</i>	9. Autorizado por <i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor</i>
8. Título e Sub-Título <i>SUB-BANDAS BIDIMENSIONAIS EM IMPLANTAÇÕES RASAS</i>		11. Nº de cópias <i>09</i>
10. Setor <i>DTE</i>	Código	14. Nº de páginas <i>12</i>
12. Autoria <i>E. Granato</i>		15. Preço
13. Assinatura Responsável <i>[Assinatura]</i>	16. Sumário/Notas <p><i>O confinamento próximo à superfície, produzido por implantações rasas em substrato de tipo oposto, leva à formação de sub-bandas bidimensionais, de maneira similar ao que ocorre na região de inversão de dispositivos MOS, e pode levar a uma substancial separação dos mínimos dessas sub-bandas. O potencial criado pela região de carga espacial da junção quantiza o movimento na direção perpendicular à superfície. Apresentam-se soluções analíticas aproximadas para os valores dos mínimos das sub-bandas, considerando-se um modelo simplificado para o potencial eletrônico. Apresentam-se resultados para silício implantado com fósforo.</i></p>	
17. Observações <p><i>Trabalho submetido para apresentação na 33a. Reunião Anual da SBPC, 8 a 15 de julho de 1981, Salvador, Bahia e submetido para publicação da Revista Brasileira de Física.</i></p>		

Sub-bandas Bidimensionais em Implantações Rasas

E. GRANATO

Instituto de Pesquisas Espaciais, INPE - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq - 12200 São José dos Campos, SP.

Confinement near the surface, produced by shallow ion implantation on opposite type-substrate, can lead to the formation of two-dimensional sub-bands in a way similar to what occurs in the inversion layers of MOS devices, and can give rise to a substantial separation of the minima of those sub-bands. The motion of carriers perpendicular to the surface is quantized by the space charge potential. Approximate analytical solutions for the values of sub-bands minima are presented assuming a simplified model for the electronic potential. Results for Si implanted with phosphorous are presented.

O confinamento próximo à superfície, produzido por implantações rasas em substrato de tipo oposto, leva à formação de sub-bandas bidimensionais, de maneira similar ao que ocorre na região de inversão de dispositivos MOS, e pode levar a uma substancial separação dos mínimos dessas sub-bandas. O potencial criado pela região de carga espacial da junção quantiza o movimento na direção perpendicular à superfície. Apresentam-se soluções analíticas aproximadas para os valores dos mínimos das sub-bandas, considerando-se um modelo simplificado para o potencial eletrônico. Apresentam-se resultados para silício implantado com fósforo.

1. INTRODUÇÃO

Considerável estudo vem sendo realizado sobre a formação de sub-bandas bidimensionais em dispositivos semicondutores¹, concentrando-se principalmente em camadas de inversão e acumulação na superfície desses materiais. Recentemente, dispositivos de efeito de campo de junção², também vêm recebendo alguma atenção.

Através de implantação iônica de baixa energia em materiais semicondutores, podem-se introduzir impurezas bem próximas à superfície. Se isso é realizado em substrato do tipo oposto, uma junção p - n é formada a uma certa profundidade. Nas Figuras 1a e 1b tem-se, respectivamente, um diagrama esquemático dos perfis de impurezas e da estrutura de bandas, em equilíbrio, para o caso de implantação com doadores. O elétron, na implantação, fica confinado em um poço de potencial formado pela superfície do semicondutor, superfície esta representada por uma barreira infinita e pela barreira de potencial da junção, podendo-se mover livremente apenas, no plano paralelo à superfície. No caso de uma implantação muito rasa, esse confinamento pode levar a uma quantização do movimento na direção perpendicular à superfície, disso resultando que os níveis de energia do elétron, são dados por³

$$E = E_j + \frac{\hbar^2}{2m_1^*} k_1^2 + \frac{\hbar^2}{2m_2^*} k_2^2 \quad (1)$$

onde m_1^* e m_2^* são as massas efetivas paralelas à superfície e k_1 e k_2 as componentes do vetor de onda bidimensional paralelo à superfície.

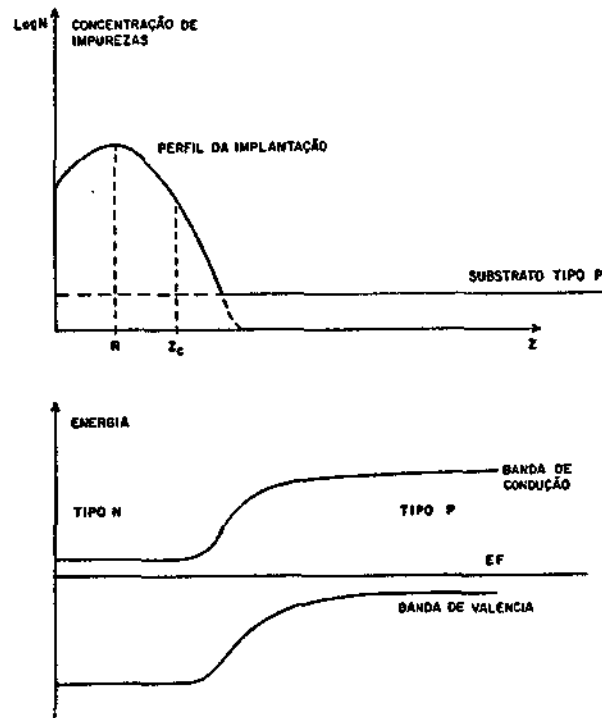


Fig. 1 - (a) Perfil de impurezas, (b) Estrutura de bandas.

E_i fica restrito a valores discretos que são determinados pela equação unidimensional de Schrödinger

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} \psi_i(z) + [V(z) - E_i] \psi_i(z) = 0 \quad (2)$$

onde m^* é a massa efetiva na direção z perpendicular à superfície, e $V(z)$ a energia potencial confinante.

Formam-se assim sub-bandas de energia com mínimos E_i , semelhantes ao sistema formado em estruturas MOS³.

O objetivo desse trabalho é de, através de um modelo simplificado para $V(z)$, e com uma análise aproximada, estimar os 3 primeiros valores dos mínimos das sub-bandas na Equação 2. Isto tem interesse, já que fornece subsídios para estudos experimentais que vem sendo realizados em sistemas como esse⁴, principalmente estabelecendo a ordem de grandeza em que podem aparecer efeitos quânticos.

2. CÁLCULO

Considera-se a distribuição de impurezas dada por⁵:

$$N_D(z) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp \left(- \frac{(z - R)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (3)$$

onde N_0 é a dose da implantação medida como uma corrente elétrica; σ é o desvio padrão projetado; e R é o alcance médio projetado, para um tipo particular de íon, sendo fixados pela energia do feixe incidente.

A junção se forma no ponto em que $N_D(z) = N_S$ (Figuras 1a e 1b), onde N_S é a concentração uniforme do substrato.

Considera-se a ionização total das impurezas e a aproximação de depleção total. A região de cargas espaciais estendo-se até uma profundidade z_c (Figura 1a), onde termina abruptamente.

Entre 0 e z_c supõe-se que o potencial elétrico seja constante e igual a zero.

Para $z \geq z_c$ o potencial $\bar{\phi}$ é obtido resolvendo-se a Equação de Poisson

$$\frac{d^2}{dz^2} \phi(z) = \frac{-e}{\epsilon} [N_D(z) - N_S] \quad (4)$$

onde ϕ é o potencial elétrico, e ϵ é a permissividade elétrica do semi condutor.

$$\text{Defini-se } u = \frac{z - R}{\sigma} \text{ e } f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)$$

resolvendo-se a Equação 4, e como $V(z) = -e \phi(z)$, obtêm-se

$$V(u) = \frac{e^2 \sigma N_0}{\epsilon} f(u) - \frac{e^2 \sigma N_0}{\epsilon} f(u_c) + \frac{e^2 \sigma N_0 u}{\epsilon} \int_{u_c}^u f(u) du - \frac{e^2 \sigma^2 N_S}{2\epsilon} \cdot (u - u_c)^2 \quad (5)$$

$$\text{onde } u_c = \frac{z_c - R}{\sigma}$$

Efetuando-se a expansão de Taylor da Expressão 5 até o termo quadrático, em torno de u_c , obtém-se

$$V(u) = \frac{1}{2} m^* \sigma^2 \omega_0^2 (u - u_c)^2 \quad (6)$$

$$\text{onde } \omega_0 = e \left\{ \frac{1}{em^*} \left[\frac{N_0}{\sigma} f\left(\frac{z_c - R}{\sigma}\right) - N_S \right] \right\}^{1/2} \quad (7)$$

A validade dessa aproximação pode ser verificada a posteriori comparando-se a Expressão 5 com a 6 na região dos primeiros 3 mínimos das sub-bandas que se deseja obter. Tal comparação é feita nas Figuras 2 e 3, para dois valores de u_c , indicando razoável concordância dentro dos limites de aproximação já usados.

Portanto o potencial de confinamento na região n é dado por:

$$V(z) = \begin{cases} 0, & z \leq z_c \\ \frac{1}{2} m^* \omega_0^2 (z - z_c)^2, & z \geq z_c \end{cases} \quad (8)$$

e, em $z = 0$, diverge para o infinito. Introduzindo-se a Expressão 8 na Equação 2 e usando-se o método WKB para determinar os valores E_i nesta última, resulta

$$E = 2\left(i + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_0 + \frac{m^* \omega_0^2 z_c^2}{\hbar^2} \left\{ 1 - \left[1 + \frac{(n + \frac{1}{2})\hbar^2 \pi}{m^* z_c^2 \omega_0} \right]^{1/2} \right\} \quad (9)$$

A Expressão 9 é uma solução geral da Equação 2 para o potencial dado pela Expressão (8), onde $i = 0, 1, 2, 3 \dots$. No entanto, dentro das aproximações usadas, considera-se apenas $i = 0, 1$ e 2 .

3. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Uma Expressão similar à Expressão 9 foi obtida por Urye e Holm-Kennedy⁶ (1977) na solução do mesmo problema, relacionado com dispositivos de efeito de campo de junção, a diferença residindo na definição 7, uma vez que naquele caso, o perfil de doadores era uniforme.

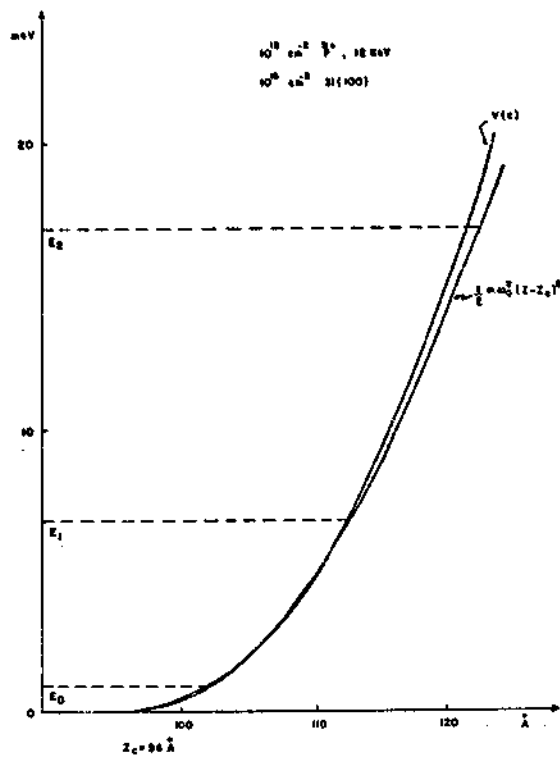


Fig. 2 - Aproximaçãõ da energia potencial $v(z)$, para $z_c = 96 \text{ \AA}$.

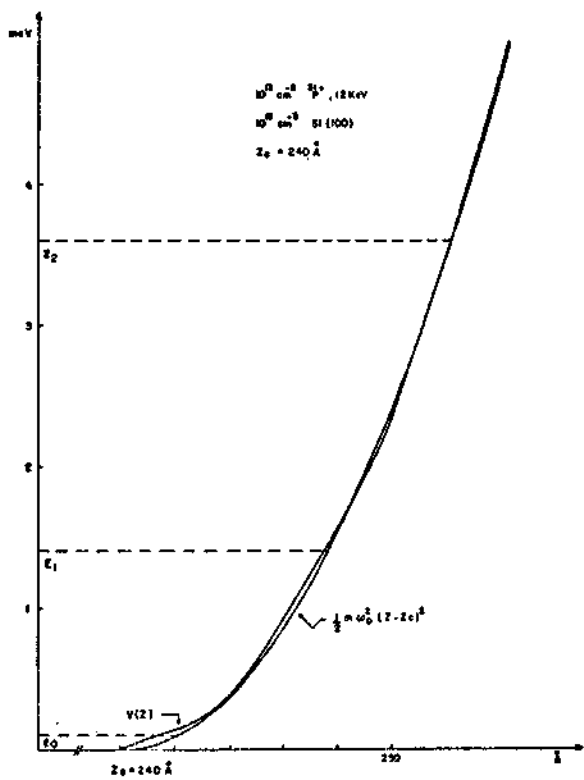


Fig. 3 - Aproximaçãõ da energia potencial $V(z)$ para $z_c = 240 \text{ \AA}$.

Resultados para silício do tipo p implantado com fósforo e com $\sigma = 90 \text{ \AA}^0$, $R = 168 \text{ \AA}^0$ e para duas doses diferentes encontram-se nas Figuras 4 e 5. A escolha desses parâmetros deve-se à possibilidade de obter amostras com aproximadamente essas características, para um estudo experimental do problema. Os mínimos das sub-bandas são representados em função da extensão de confinamento z_c . Pode-se observar separação apreciável dos mínimos das sub-bandas para determinados valores z_c .

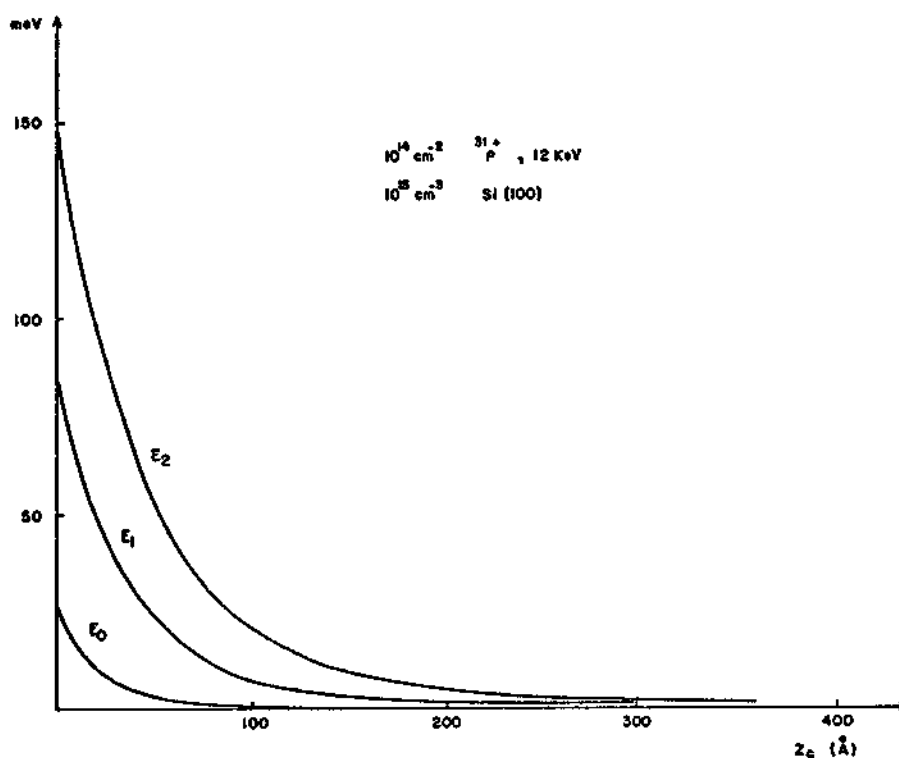


Fig. 4 - Três primeiros mínimos de energia das sub-bandas em função do confinamento.

A extensão do confinamento pode ser variada através de uma polarização elétrica aplicada entre a implantação e o substrato, ou mediante a utilização de concentrações de substrato diferentes.

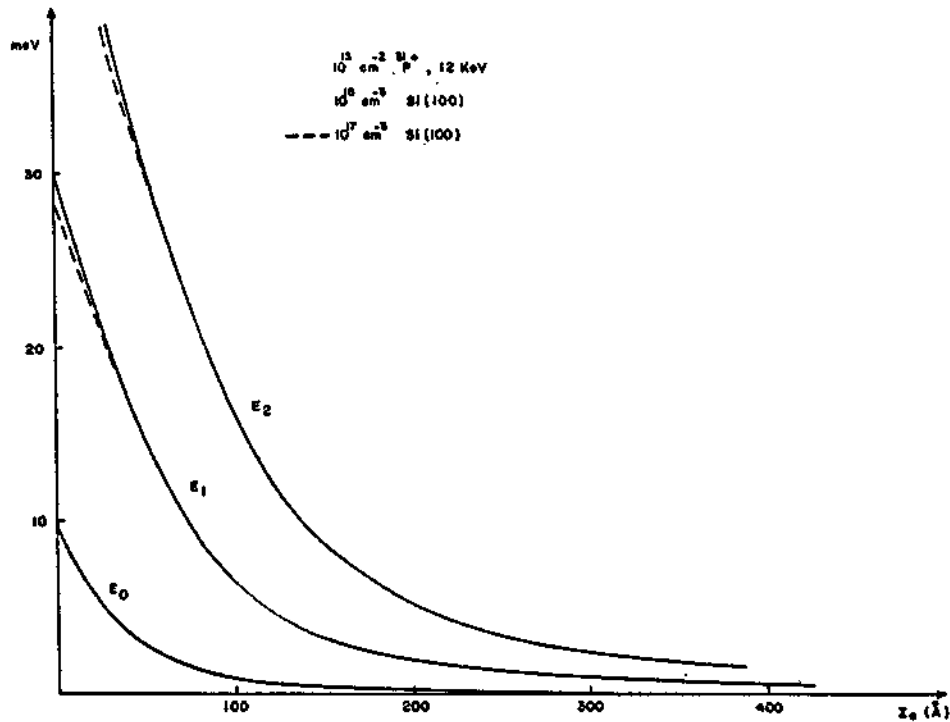


Fig. 5 - Três primeiros mínimos de energia das sub-bandas em função do confinamento.

Aumentando-se a concentração do substrato, a junção se forma mais próxima à superfície e, portanto, o confinamento atingido sem polarização é maior. Com concentrações diferentes de substrato, E_i se altera através do efeito sobre ω_0 (Equação 7). No entanto pode-se observar, pela Figura 5, onde se comparam curvas para duas concentrações diferentes, que essa alteração é muito pequena.

Entretanto, o primeiro processo fica limitado pelo "breakdown" do semiconductor. Usando-se as expressões obtidas na solução de junção de perfil qualquer em equilíbrio⁷, obtem-se a variação de z_c com a polarização aplicada. Isso se encontra representado na Figura 6, para diferentes concentrações do substrato. Observa-se que, usando-se concentrações maiores da variação possível é mais apreciável.

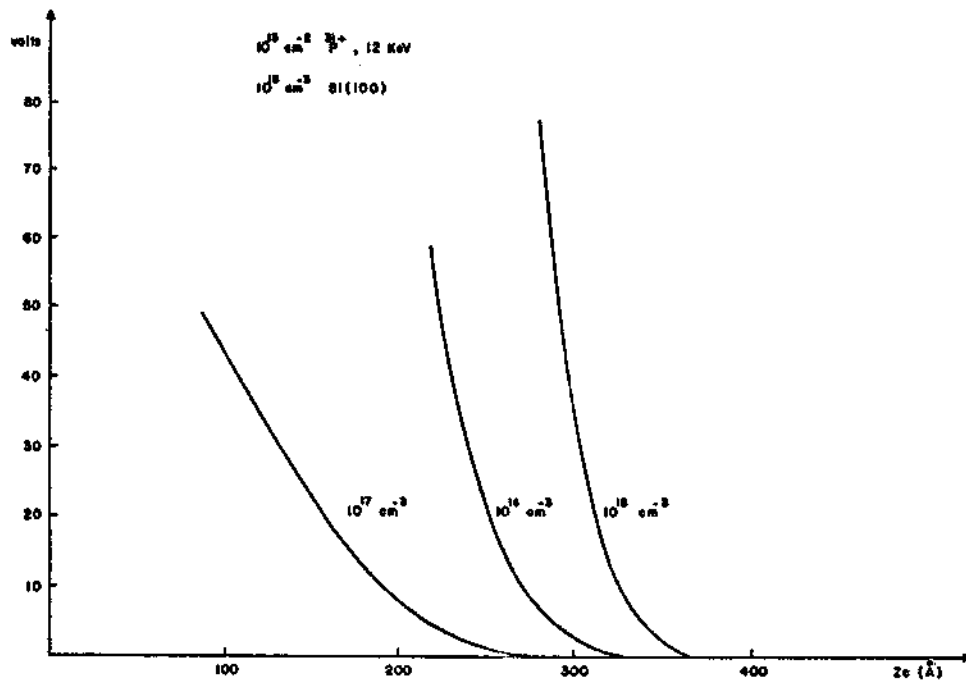


Fig. 6 - Extensão do confinamento em função da polarização aplicada.

Em conclusão, implantações rasas em substrato de tipo oposto, usando-se baixas energias, pode levar a uma estrutura em que efeitos quânticos são apreciáveis, com substancial separação dos mínimos de energia das sub-bandas bidimensionais. Entre outros fatores, é importante a escolha apropriada do substrato e dos parâmetros que caracterizam a implantação.

REFERÊNCIAS

1. Adkims, C.J. J. Phys. C11 B51 (1978).
2. Holm-Kennedy, J.W. and Ury, I. Bull. Amer. Phys. Soc. 20 (1979) 405.
3. Stern, F. Phys. Rev., B5, 4891 (1972).

4. Granato, E.; Ranvaud, R.; Ferreira da Silva, A.; Lima, I.C.C. e Souza, J.P.de Revista Brasileira de Física (submetido).
5. Gibbons, J.F. Proc IEEE, 56, 3, 295 (1968).
6. Ury, I. and Holm-Kennedy, J.W. Second International conference "Electronic properties of two dimensional systems", Part 1, 334, (1977).
7. Granato, E. INPE, relatório interno, (1981).