


JANETE MOUALLEM

Engenheira Elétrica, ênfase Eletrônica

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1986.

Este exemplar corresponde à redação final da defendida por <u>Janete Mouallem</u>
... e aprovada pela Comissão
Julgada em <u>09</u> / <u>08</u> / <u>1991</u>
 Orientador

**UMA NOVA PROPOSTA PARA CONFECCÃO DA EXTENSÃO DA TERMINAÇÃO DA
JUNÇÃO (JTE) EM DISPOSITIVOS PLANARES DE ALTA TENSÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia de Campinas da UNICAMP
como requisito parcial para a
obtenção do título de "Mestre em
Engenharia Elétrica".

BC/9109434

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias†

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia de Campinas
Departamento de Engenharia Elétrica
Laboratório de Eletrônica e Dispositivos**

Agosto de 1991

Agradecimentos

Ao Prof. José Antonio Siqueira Dias pela orientação e organização dadas ao trabalho.

Aos professores e funcionários do Laboratório de Eletrônica e Dispositivos - LED/UNICAMP e da Escola Federal de Engenharia de Itajubá que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Sabe-se que a curvatura da junção reduz a tensão de ruptura de junções p-n. Neste trabalho, desenvolveu-se uma técnica simples que usa pré-deposição convencional de boro com fontes dopantes sólidas, para fazer uma Extensão da Terminação da Junção (Junction Termination Extension - JTE) em substituição aos processos de implantação de íon de alto custo. Para a obtenção de níveis de dopagem extremamente baixos para a fabricação do JTE, uma camada de óxido bem fina é previamente crescida sobre o "wafer", por uma oxidação à baixa temperatura, atuando como uma barreira para a carga de boro, controlando a carga líquida que alcança a superfície do silício.

ABSTRACT

Junction curvature has been known to reduce the breakdown voltage of p-n junctions. A simple technique that uses conventional boron pre-deposition with solid sources dopants was developed in this work to make Junction Termination Extension (JTE) in substitution for the high cost ion-implanted processes. To obtain the extremely low doping levels for the fabrication of the JTE, a very thin oxide layer previously grown on the wafer by a LTO acts as a barrier to the boron charge, controlling the net charge that reaches the silicon surface.

Índice

0. Introdução	
Introdução	i
I. Revisão das Técnicas de Terminação de Junção Existentes	
I.1. Terminações de Difusão Planar	I.1
I.1.1. Junção Cilíndrica	I.2
I.1.2. Junção Esférica	I.8
I.2. Anéis de Campo Flutuante	I.11
I.3. Múltiplos Anéis de Campo Flutuante	I.16
I.4. Junções Terminadas por meio de Abrasão Mecânica ...	I.18
I.4.1. Junção com Ângulo Positivo de Abrasão Mecânica	I.20
I.4.2. Junção com Ângulo Negativo de Abrasão Mecânica	I.21
I.5. Terminações do Tipo Contorno Decapado (Etch Contour)	I.25
I.5.1. Contornos com Ângulo Positivo de Decapagem .	I.26
I.5.2. Contornos com Ângulo Negativo de Decapagem .	I.27
I.6. Placas de Campo	I.29
I.7. Extensão da Terminação da Junção	I.32
II. A Terminação de Junção Utilizada	
II.1. Processos de Difusão	II.1
II.2. Projeto do Processo de Difusão e Resultados de Simulações	II.2
III. Trabalhos de Laboratório	
III.1. Projeto das Máscaras	III.1
III.2. Difusão das Estruturas	III.4
IV. Conclusão	
Conclusão	IV.1
V. Bibliografia	
Bibliografia	V.1
Apêndice A - J. Mouallem and J.A.S. Dias, "An All Diffused Junction Termination Extension Process for High Voltage Devices", MIEL Conference, Yugoslavia, 1991	A.1

Introdução

A tensão de ruptura de um dispositivo semicondutor de potência é uma de suas características mais importantes. Juntamente com sua capacidade de corrente máxima, este parâmetro determina a relação de potência do dispositivo. Dependendo da aplicação do dispositivo de potência, sua tensão de ruptura pode variar desde um valor tão baixo quanto 25 volts, para retificadores de saída de alta velocidade usados em fontes de potência de chaveamento para circuitos integrados, até um valor acima de 6000 volts, para tiristores usados em malhas de transmissão DC de alta tensão. Nestes dispositivos, a tensão é suportada pela camada de depleção formada em uma junção P-N, uma interface metal-semicondutor (barreira Schottky) ou, uma interface metal-óxido-semicondutor (MOS).

A terminação da junção limita o valor da tensão de ruptura de dispositivos reais (fixado pela análise de uma junção semi-infinita) [1]. Se a junção possui uma terminação pobre, sua tensão de ruptura pode ser tão baixa quanto 10 a 20% do caso ideal. Esta degradação na tensão de ruptura pode comprometer seriamente o projeto do dispositivo.

A Extensão da Terminação da Junção (JTE) [2] é uma das técnicas mais promissoras para o desenvolvimento de dispositivos de potência de alta tensão compatíveis com a tecnologia padrão de Circuito Integrado. Embora tenha sido proposta vários anos atrás, só recentemente tem recebido maior atenção [3,4,5]. Entre as vantagens da técnica JTE estão a pequena área e a baixa sensibilidade da dopagem do substrato, quando comparado com a maioria dos dispositivos de alta tensão planar fabricados hoje, que usam técnicas como anéis limitantes de campo ou placa de campo para reduzir o pico do campo elétrico na extremidade das junções, e maximizar a tensão de ruptura do dispositivo.

Entretanto, para se fabricar tais extensões da terminação da junção, é necessário fazer uma região implantada P⁻ de dopagem bem baixa, que envolve as junções de alta tensão. As doses implantadas estão na faixa de $1 \cdot 10^{12}$ at/cm², para um substrato de 40 ohm.cm. Este nível de dopagem é muito difícil se obter com processos convencionais de difusão (com dopantes de fonte gasosa ou sólida), mesmo com uma pré-deposição à baixa temperatura.

Capítulo I

Revisão das Técnicas de Terminação de Junção Existentes

Com o intuito de se conseguir altas tensões de ruptura, várias técnicas de terminação de dispositivos foram desenvolvidas [6,7,8]. À seguir, tem-se as técnicas mais comumente usadas.

I.1. Terminações de Difusão Planar

No caso de tiristores e retificadores de corrente alta, onde um único dispositivo é feito em toda a lâmina, é comum usar técnicas de abrasão mecânica para a terminação das junções. Esta técnica de terminação do dispositivo será discutida posteriormente. Para dispositivos de correntes menores, um grande número de dispositivos são fabricados em uma única lâmina. Nestes casos, não é prático o uso da técnica de abrasão mecânica. A terminação de junção mais comumente usada para estes dispositivos é baseada na tecnologia de difusão planar.

A difusão planar é baseada na habilidade de, seletivamente, introduzir dopantes dentro da superfície do semiconductor, pelo uso ou de uma camada de óxido como máscara contra a difusão dopante, ou pelo uso de uma camada fotoresiste, para bloquear o dopante durante a implantação de íons. Quando a junção é fabricada difundindo-se o dopante em uma região delimitada, isto pode ser tratado como um plano paralelo no interior da janela de difusão [1]. Porém, o dopante também difunde lateralmente nas junções, como ilustrado na figura I.1. A difusão lateral de dopantes nas junções é de aproximadamente 85% da profundidade vertical x_j [1].

Para uma análise aproximada da tensão de ruptura, pode-se considerar que a difusão lateral é igual a profundidade da junção. Desta suposição, pode-se concluir que a junção assume um contorno cilíndrico nas bordas da janela de difusão e um contorno esférico nos cantos da janela de difusão. A camada de depleção da junção segue estes contornos. A distribuição de campo elétrico nas junções difere das linhas paralelas representativas da parte plana-paralela. Uma vez que o balanço de cargas entre os dois lados da junção deve ser estabelecido, a curvatura da junção conduz à concentração do campo elétrico, como ilustrado na figura I.2. O maior campo elétrico nas bordas da junção conduz a uma maior ionização de impacto. Consequentemente, espera-se que a ruptura das junções planares ocorra nas bordas, ao invés de ocorrer na parte plana-paralela.

À seguir será feita uma rápida explicação sobre ionização de impacto [1]. Quanto mais tensão é aplicada à camada de depleção, maior é o campo elétrico e os portadores móveis são acelerados, para maiores velocidades. Quando o campo elétrico excede 1.10^5 V/cm, os portadores móveis alcançam a velocidade de saturação de aproximadamente 1.10^7 cm/seg. Em campos elétricos maiores, estes portadores têm energia suficiente para que suas colisões com os átomos da estrutura atômica possam excitar os elétrons da banda de

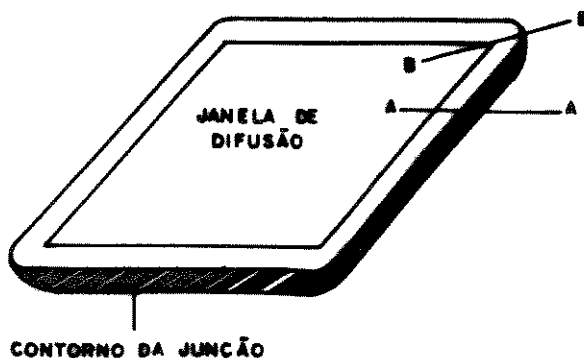


Figura I.1 - Junção planar formada pela difusão através de uma janela de difusão retangular

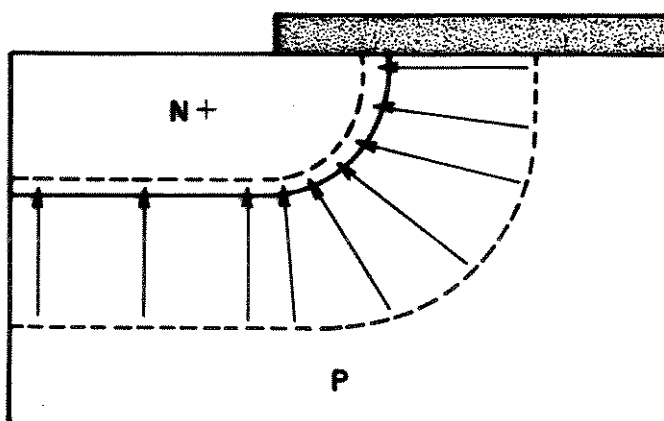


Figura I.2 - Concentração do campo elétrico na borda da junção cilíndrica

valência para a banda de condução. Este processo para a geração de pares elétron lacuna é chamado "ionização de impacto". Uma vez que os pares elétron-lacuna criados na camada de depleção pelo processo de ionização de impacto sofrem uma aceleração pelo campo elétrico existente, ele também participa da criação de mais pares elétron-lacuna. Consequentemente, a ionização de impacto é um fenômeno multiplicativo que conduz a uma cascata de portadores móveis transportados através da camada de depleção. Considera-se que o dispositivo alcança a ruptura por avalanche quando a taxa de ionização de impacto aproxima-se do infinito, pois o mesmo não suporta um incremento na tensão aplicada. A ruptura por avalanche representa uma limitação fundamental à tensão de operação máxima de dispositivos de potência.

I.1.1. Junção Cilíndrica

Considere a junção planar mostrada na figura I.1. Uma seção transversal em A-A está ilustrada na figura I.3. Assumindo-se que

a difusão lateral é igual a profundidade da junção vertical, a junção cilíndrica resultante tem um raio r_j . A camada de depleção estende-se desde a junção sobre o lado levemente dopado até um raio r_d . Para o caso de uma região fortemente dopada, a largura da camada de depleção sobre o lado difundido pode ser desprezada. Dentro da camada de depleção, a equação de Poisson em coordenadas cilíndricas é dada por:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right) = - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r\epsilon) = \frac{q N_A}{\epsilon_s} \quad (I.1)$$

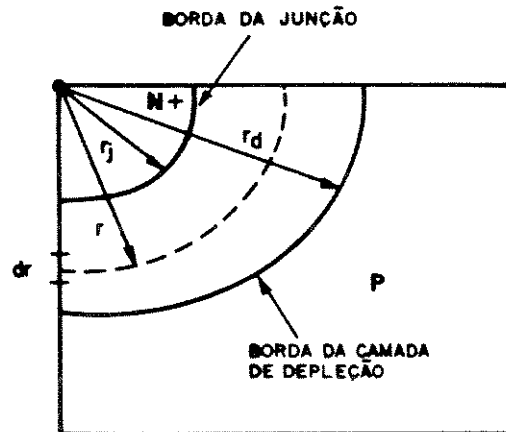


Figura I.3 - Camada de depleção na borda da junção cilíndrica

onde a distribuição de potencial $V(r)$ e a distribuição de campo elétrico $\epsilon(r)$ são definidas ao longo de um raio dentro da camada de depleção. O lado levemente dopado da junção tem uma concentração homogênea, de dopagem N_A . A integração desta equação, com a condição de contorno de que o campo elétrico deve ser zero na borda da camada de depleção (i.e., em r_d), fornece a seguinte distribuição de campo elétrico:

$$\epsilon(r) = \frac{q N_A}{2 \epsilon_s} \left(\frac{r_d^2 - r^2}{r} \right) \quad (I.2)$$

Como no caso da junção plana-paralela, o campo elétrico máximo ocorre na junção metalúrgica:

$$\epsilon_m(r_j) = \frac{q N_A}{2 \epsilon_s} \left(\frac{r_d^2 - r_j^2}{r_j} \right) \quad (I.3)$$

O campo elétrico máximo para a junção cilíndrica pode ser substancialmente maior do que o campo elétrico para a parte plana-paralela. Isso pode ser facilmente ilustrado para o caso onde o raio de curvatura r_j da junção é muito menor do que a largura r_d da camada de depleção. O campo elétrico máximo é dado

por:

$$\epsilon_{m,CIL}(r_j) \approx \frac{q N_A}{2 \epsilon_s} \frac{r_d^2}{r_j} \quad (I.4)$$

onde o subscrito CIL se refere à região cilíndrica da junção. O campo elétrico correspondente na parte plana-paralela, é:

$$\epsilon_{m,PP}(r_j) = \frac{q N_A}{\epsilon_s} r_d \quad (I.5)$$

Tomando-se a relação destas expressões, obtemos:

$$\frac{\epsilon_{m,CIL}}{\epsilon_{m,PP}} \approx \frac{r_d}{2 r_j} \quad (I.6)$$

Esta equação, válida para junções não profundas com pequeno raio de curvatura, indica que o pico do campo elétrico na borda da junção cilíndrica é substancialmente maior do que na parte plana-paralela. Isso também demonstra que o efeito da terminação da junção cilíndrica sobre o campo elétrico torna-se maior com o incremento da polarização reversa aplicada à junção. A ruptura por avalanche é, então, confinada à borda, devido a dependência muito forte do coeficiente de ionização de impacto com o campo elétrico [1].

A distribuição de potencial na terminação da junção cilíndrica pode ser obtida integrando-se a equação (I.2):

$$V(r) = \frac{q N_A}{2 \epsilon_s} \left[\left(\frac{r_j^2 - r^2}{2} \right) + r_d^2 \ln \left(\frac{r}{r_j} \right) \right] \quad (I.7)$$

Usando-se a condição de contorno de que o potencial em $r=r_d$ deve ser igual a tensão de polarização reversa aplicada, a largura da camada de depleção pode ser derivada desta equação.

Para analisar a tensão de ruptura da junção cilíndrica, é necessário resolver a integral de ionização pelo uso da distribuição de campo elétrico dada pela equação (I.2). Uma solução analítica não pode ser obtida com o uso desta equação. Porém, uma solução analítica pode ser obtida utilizando-se uma aproximação para a distribuição de campo elétrico, baseada na suposição de que a ionização de impacto ocorre, principalmente, na região de alto campo elétrico, perto da junção metalúrgica [9]. Esta suposição permite a seguinte aproximação:

$$\epsilon(r) = \frac{K}{r} \quad (I.8)$$

Esta variação hiperbólica na distribuição de campo elétrico é comparada com a distribuição real de campo na figura I.4. Um ponto importante a ser notado é a similaridade na distribuição de campo próximo da junção metalúrgica para os dois casos. Porém, a distribuição de campo hiperbólica implica em uma camada de depleção que se estende para o infinito. Assim, a integral de ionização também deve ser estimada desde r_j até o infinito, quando

a equação (I.8) é usada. Resolvendo-se a integral de ionização com o uso do coeficiente de ionização dado por $\alpha = 1.8 \times 10^{-35} \epsilon^7$ [1], pode-se derivar uma expressão do campo elétrico de ruptura crítico para a junção cilíndrica:

$$\epsilon_{C,CIL} = \left(\frac{3.25 \times 10^{35}}{r_j} \right)^{1/7} \quad (I.9)$$

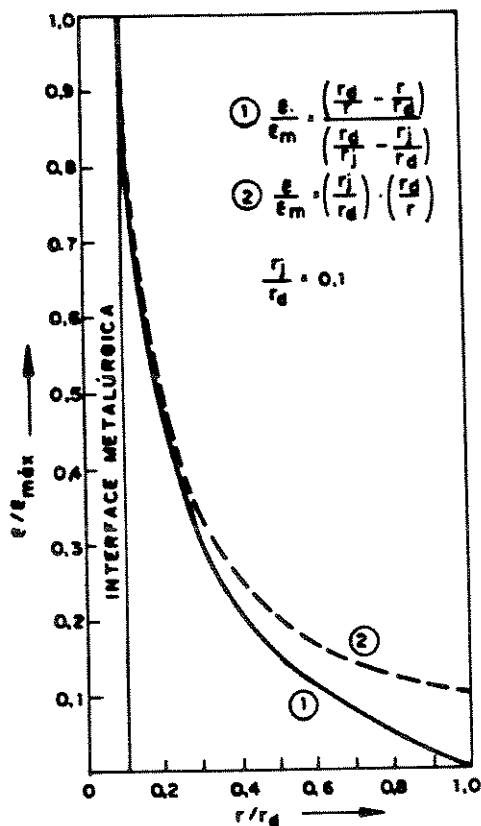


Figura I.4 - Comparação da distribuição hiperbólica (2) de campo elétrico com a distribuição real (1) de campo elétrico de uma junção cilíndrica

É útil normalizar estes parâmetros do campo elétrico de ruptura crítico em relação ao caso plano-paralelo:

$$\frac{\epsilon_{C,CIL}}{\epsilon_{C,PP}} = \left(\frac{3 W_{C,PP}}{4 r_j} \right)^{1/7} \quad (I.10)$$

Esta relação está representada graficamente na figura I.5.

Usando-se o campo elétrico de ruptura crítico para a junção cilíndrica, pode-se derivar uma expressão para a tensão de ruptura. É útil normalizar a tensão de ruptura da junção cilíndrica em relação a tensão de ruptura do caso plano-paralelo, para se obter uma expressão geral, que seja independente do nível de dopagem do substrato:

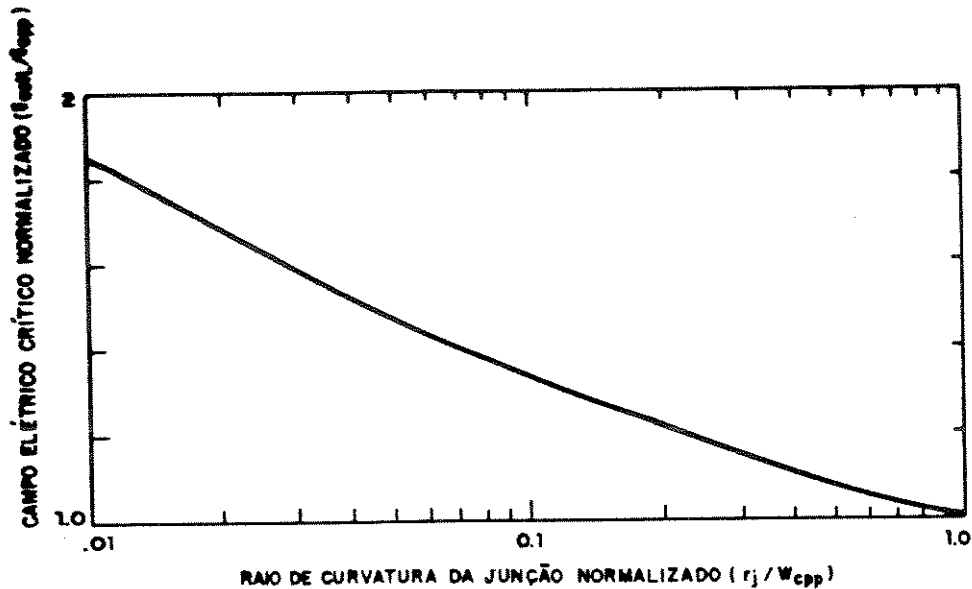


Figura I.5 - Campo elétrico crítico normalizado para uma junção cilíndrica em função do raio de curvatura normalizado

$$\frac{BV_{CIL}}{BV_{PP}} = \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{r_j}{W_c} \right)^2 + 2 \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} \right] \ln \left[1 + 2 \left(\frac{W_c}{r_j} \right)^{8/7} \right] - \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} \right\} \quad (I.11)$$

Esta expressão está representada graficamente na figura I.6. Pode-se mostrar [9] que as tensões de ruptura obtidas pelo uso desta equação estão de acordo com aquelas calculadas por técnicas numéricas [10], para uma larga faixa de valores do raio de curvatura e do nível de dopagem de substrato.

Soluções numéricas para a ruptura por avalanche de junções cilíndricas incluindo o efeito do perfil de difusão são apresentadas em [11]. A normalização do campo elétrico crítico e da tensão de ruptura em relação aos valores correspondentes ao de uma junção difundida semi-infinita, também resulta na condensação de todos os dados em uma única curva. Esta curva é indicada pelas linhas tracejadas na figura I.6. Para a obtenção desta curva, o raio de curvatura foi normalizado em relação a largura da camada de depleção, na ruptura, sobre o lado levemente dopado da junção, para o caso plano-paralelo. Uma expressão empírica que se ajusta à curva é [11]:

$$\frac{BV_{CIL}}{BV_{PP}} = \left[0.871 + 0.125 \ln \left(\frac{r_j}{W_{C,PP}} \right) \right]^2 \quad (I.12)$$

Da figura I.6, pode-se ver que a equação (I.11), obtida da solução analítica, fornece aproximadamente os mesmos resultados.

Das análises anteriores à da figura I.6, pode-se ver que a tensão de ruptura por avalanche de junções difundidas planares é sempre menor do que para o caso semi-infinito (plano-paralelo). Quando o raio de curvatura (i.e., a profundidade de difusão da junção) aumenta, a tensão de ruptura aumenta, e começa a se aproximar do caso plano-paralelo. A razão para isto pode ser ilustrada comparando-se a distribuição de campo elétrico de uma junção não profunda com a de uma junção profunda, para um mesmo

nível de dopagem de substrato. Os dois casos terão as mesmas larguras de depleção sobre o lado levemente dopado, para uma dada tensão de polarização reversa, como ilustra a figura I.7. As linhas de campo elétrico mostram, porém, no caso da junção não profunda, uma concentração muito maior, indicando um campo elétrico local maior para esta junção. Isto ocorre porque a carga positiva na região N^+ , na qual as linhas de campo terminam, está localizada em um ponto próximo da superfície ao invés de ser espalhado ao longo de um vasto contorno da junção, como no caso da junção profunda. A maior concentração das linhas de campo elétrico para a junção não profunda é responsável por sua menor tensão de ruptura, em relação a uma junção mais profunda. Da figura I.7 pode-se deduzir que a concentração das linhas de campo elétrico não é determinada pela profundidade absoluta da junção, mas pela sua dimensão relativa à largura da camada de depleção. Essa é a razão da normalização da profundidade da junção em relação à largura da camada de depleção. Pode-se concluir que junções mais rasas podem ser usadas para a fabricação de dispositivos de baixa tensão, enquanto dispositivos de alta tensão irão requerer junções profundas.

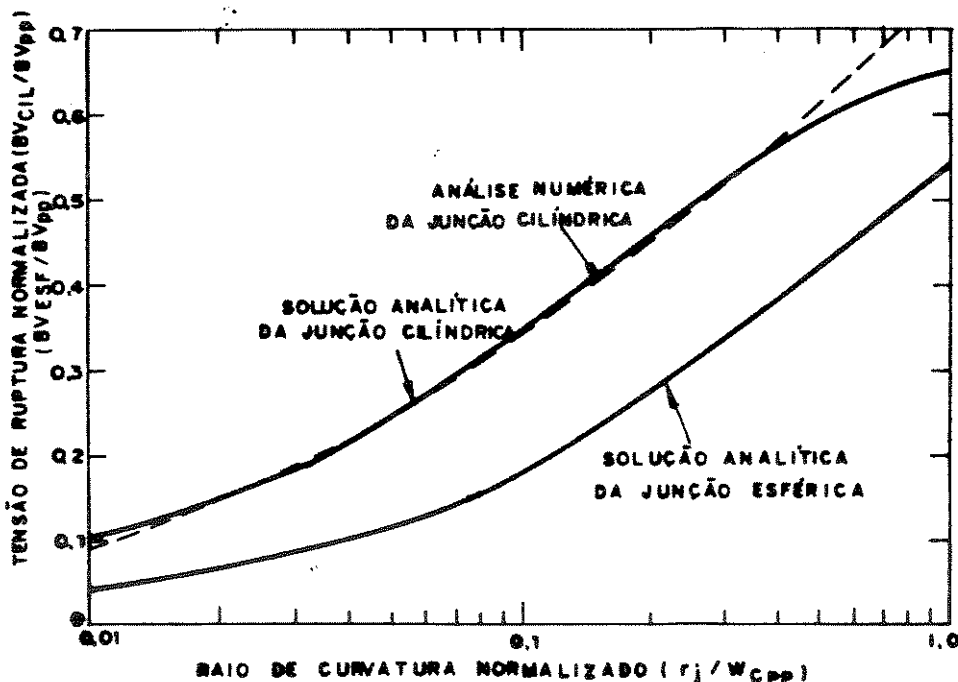


Figura I.6 - Tensão de ruptura normalizada de junções cilíndricas e esféricas como uma função do raio de curvatura normalizado

Da figura I.6 pode-se ver que uma terminação de junção cilíndrica pode resultar em valores para as tensões de ruptura menores do que a metade dos obtidos no caso plano-paralelo. Métodos para superar este problema, usando anéis de campo e placas de campo, serão descritos posteriormente.

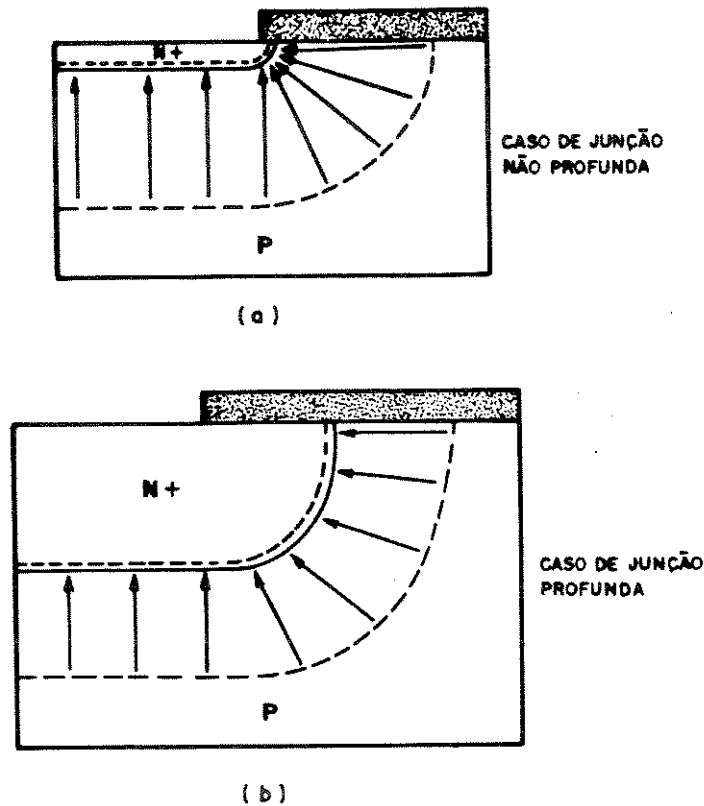


Figura I.7 - Concentração do campo elétrico nas bordas de uma junção (a) não profunda e (b) profunda

I.1.2. Junção Esférica

Uma junção planar, formada por difusão através de uma janela retangular, está mostrada na figura I.1. Na seção transversal A-A temos uma junção cilíndrica. Nos cantos da janela de difusão, a junção toma a forma de um quarto de esfera com um raio de curvatura igual a profundidade da junção, se assumirmos que a difusão lateral é igual a difusão vertical. A tensão de ruptura desta região da junção planar pode ser analisada pela solução da equação de Poisson em coordenadas esféricas:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r^2 \epsilon) = \frac{q N_A}{\epsilon_s} \quad (\text{I.13})$$

Integrando-se esta equação e usando-se a condição de contorno de que o campo elétrico é zero na borda da camada de depleção (r_d), podemos derivar a distribuição do campo elétrico:

$$\epsilon(r) = \frac{q N_A}{3 \epsilon_s} \left(\frac{r_d^3 - r^3}{r^2} \right) \quad (\text{I.14})$$

O campo elétrico máximo para a junção esférica ocorre na interface metalúrgica, e é dado por:

$$\epsilon_m(r_j) = \frac{q N_A}{3 \epsilon_s} \left(\frac{r_d^3 - r_j^3}{r_j^2} \right) \quad (I.15)$$

Como no caso da junção cilíndrica, este campo elétrico máximo é substancialmente maior do que na parte plana-paralela. Se considerarmos uma junção com pequenos raios de curvatura em relação à largura da camada de depleção, o campo elétrico pode ser escrito como:

$$\epsilon_{m,ESF}(r_j) \approx \frac{q N_A}{3 \epsilon_s} \frac{r_d^3}{r_j^2} \quad (I.16)$$

Normalizando esta expressão em relação ao campo elétrico máximo da parte plana-paralela da junção, temos:

$$\frac{\epsilon_{m,ESF}}{\epsilon_{m,PP}} = \frac{1}{3} \left(\frac{r_d}{r_j} \right)^2 \quad (I.17)$$

Uma comparação com a parte cilíndrica da junção através das equações (I.4) e (I.16) fornece:

$$\frac{\epsilon_{m,ESF}}{\epsilon_{m,CIL}} = \frac{2}{3} \left(\frac{r_d}{r_j} \right) \quad (I.18)$$

Assim, o campo elétrico máximo na parte esférica da junção planar é maior do que na parte cilíndrica. Consequentemente, a junção planar irá romper primeiro nos cantos, onde as junções esféricas são formadas.

A tensão de ruptura de uma junção planar, formada pelo uso de uma janela de difusão retangular, pode ser obtida pela integração da equação (I.14):

$$V(r) = \frac{q N_A}{3 \epsilon_s} \left[\left(\frac{r_j^2 - r^2}{2} \right) + r_d^3 \left(\frac{1}{r_j} - \frac{1}{r} \right) \right] \quad (I.19)$$

A largura da camada de depleção pode ser obtida pelo uso da condição de contorno de que a tensão em $r=r_d$ deve ser igual ao potencial aplicado através da junção. Para obter a tensão de ruptura por avalanche, é necessário resolver a integral de ionização com o uso da distribuição de campo elétrico dada pela equação (I.14). Uma solução analítica foi derivada [9] usando-se a seguinte aproximação:

$$\epsilon(r) = \frac{K}{r^2} \quad (I.20)$$

Efetuando-se a integral de ionização desde r_j até o infinito, com o uso da equação (I.20), tem-se o campo elétrico crítico para

ruptura de junções esféricas:

$$\epsilon_{C,ESF} = \left(\frac{7.0 \times 10^{35}}{r_j} \right)^{1/7} \quad (I.21)$$

A normalização deste campo em relação ao campo elétrico crítico de ruptura do caso plano-paralelo, resulta em:

$$\frac{\epsilon_{C,ESF}}{\epsilon_{C,PP}} = \left(\frac{13}{8} \frac{W_c}{r_j} \right)^{1/7} \quad (I.22)$$

Esta relação está representada graficamente na figura I.8. Esta é uma expressão geral para o campo elétrico crítico na ruptura de junções esféricas. A tensão de ruptura de junções esféricas pode ser derivada do campo elétrico crítico. A normalização desta tensão em relação ao caso plano-paralelo fornece:

$$\frac{BV_{ESF}}{BV_{PP}} = \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^2 + 2.14 \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} - \left[\left(\frac{r_j}{W_c} \right)^3 + 3 \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{13/7} \right]^{2/3} \quad (I.23)$$

Esta expressão está representada na figura I.6 para comparação com a junção cilíndrica. Em geral, a tensão de ruptura da junção esférica é aproximadamente duas vezes menor do que a tensão de ruptura da junção cilíndrica. Portanto, as junções esféricas devem ser evitadas. Uma vez que a junção esférica é causada pela presença de cantos pontudos, como nas bordas da janela de difusão retangular da figura I.1, tais junções podem ser evitadas arredondando-se as bordas dos dispositivos. Entretanto,

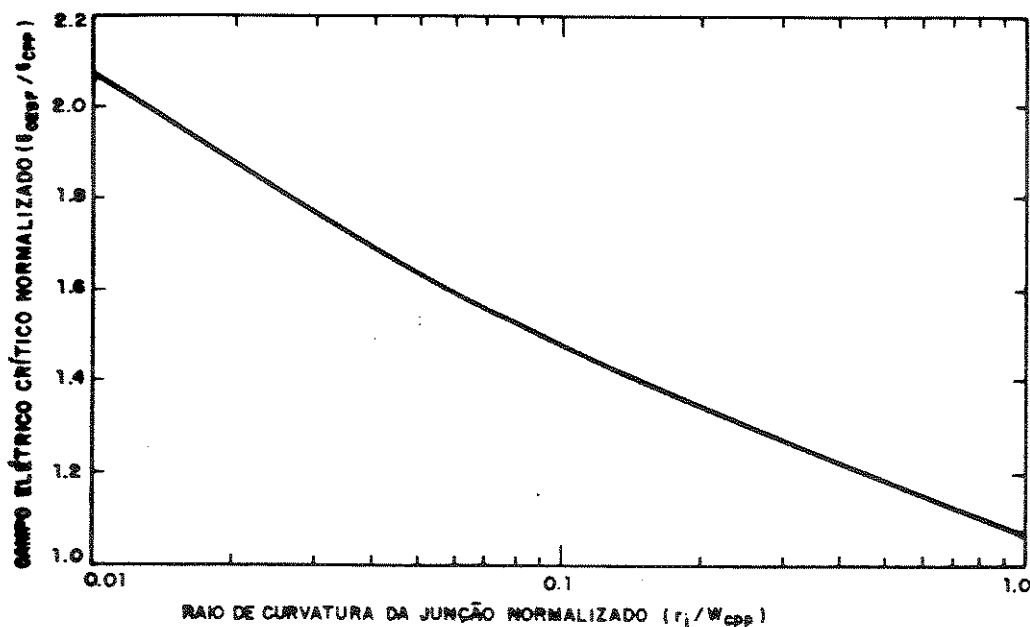


Figura I.8 - Campo elétrico crítico normalizado para ruptura de uma junção esférica

isto resulta em perda de área da junção ativa, dada por:

$$\text{Perda de área} = (4 - \pi)R^2 \quad (\text{I.24})$$

onde R é o raio de curvatura do canto.

I.2. Anéis de Campo Flutuante

Da seção anterior viu-se que o uso da tecnologia planar pode resultar em uma séria degradação na tensão de ruptura, devido os altos campos elétricos nas junções, o que pode ser reduzido com o uso de anéis de campo flutuante [12]. A denominação anéis de campo flutuante se deve ao fato de que esta técnica consiste na utilização de anéis difundidos, que são isolados da junção principal, porém localizados próximos da mesma. Estas regiões podem assumir um potencial intermediário ao potencial dos lados da junção P-N. Este potencial é estabelecido pela camada de depleção, que se estende desde a junção principal. Estes anéis de campo flutuante podem ser fabricados simultaneamente com a junção principal, com a inclusão de uma janela de difusão na máscara, envolvendo a junção principal, como ilustrado na figura I.9. É importante conservar um espaçamento uniforme entre a junção principal e o anel de campo flutuante.

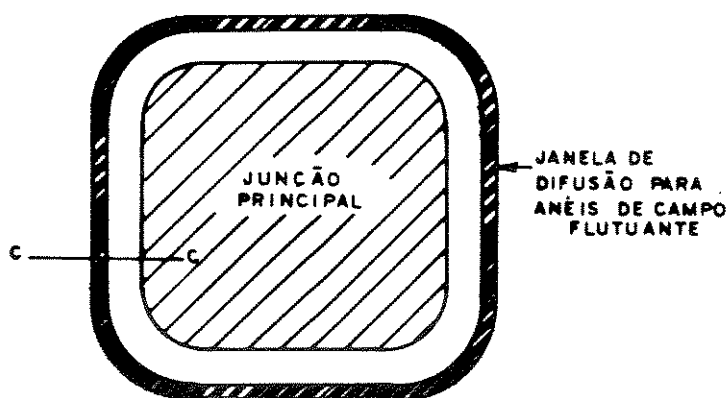


Figura I.9 - Janela de difusão com um único anel de campo flutuante

Quando o anel de campo flutuante é fabricado simultaneamente com a junção principal, suas profundidades de difusão são iguais. Uma seção transversal em C-C está ilustrada na figura I.10a. Uma seção transversal da junção sem o anel de campo flutuante está mostrada na figura I.10b, para efeitos de comparação. Pode-se ver que a concentração do campo elétrico, responsável pela baixa tensão de ruptura nas junções cilíndricas, é reduzido pela presença do anel de campo flutuante. Na polarização reversa da junção principal com baixas tensões, sua camada de depleção é pequena e não se prolonga até o anel de campo flutuante que, então, conserva o potencial da região P levemente dopada. Quando a polarização reversa sobre a junção principal aumenta, sua camada

de depleção se estende até que ocorra "punch through" com o anel de campo flutuante. A tensão na qual isto ocorre está relacionada ao mínimo espaçamento W_m entre o anel de campo flutuante e a junção principal. Se assumirmos que a difusão lateral da junção é igual a profundidade vertical, a dimensão W_m da máscara, para a localização do anel de campo flutuante, pode ser calculada com o uso da tensão de "punch-through" V_{PT} , usando-se a relação [1]:

$$W_m = 2 x_j + W_s = 2 x_j + \sqrt{\frac{2 \epsilon_s V_{PT}}{q N_A}} \quad (I.25)$$

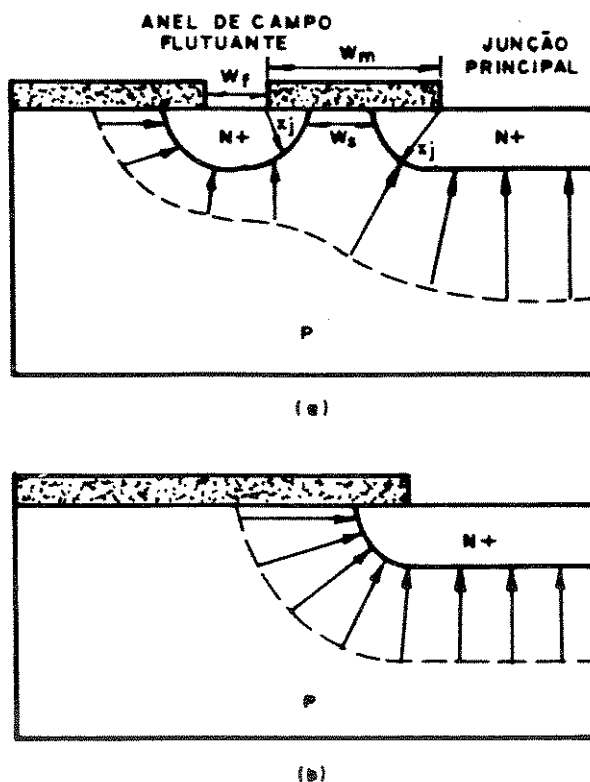


Figura I.10 - Comparação da concentração do campo elétrico para uma junção planar (a) com e (b) sem um anel de campo flutuante

Embora se espere que o anel de campo flutuante incremente a tensão de ruptura devido à menor concentração do campo elétrico, é necessário conhecer sua exata localização em relação a junção principal para que isto realmente ocorra. Se o anel de campo flutuante estiver muito distante da junção principal, ele irá ter um pequeno efeito sobre a curvatura da camada de depleção na junção principal. Assim, a ruptura ocorrerá na junção principal, sem um substancial aumento em relação ao caso cilíndrico. Se o anel de campo flutuante estiver localizado muito perto da junção principal, seu potencial será aproximadamente igual ao da junção principal. Assim, a ruptura irá ocorrer, no anel de campo, com aproximadamente a mesma tensão de quando sem o anel de campo. Uma ótima localização do anel de campo flutuante pode, entretanto,

resultar em um incremento de, aproximadamente, duas vezes na tensão de ruptura [13].

Um exemplo do efeito da localização do anel de campo flutuante sobre a tensão de ruptura é mostrado na figura I.11, onde esta tensão foi normalizada em relação ao caso plano-paralelo, e o espaçamento do anel de campo foi normalizado em relação à largura da camada de depleção, sobre o lado levemente dopado da junção. Um ponto importante a se notar, na figura I.11, é que a tensão de ruptura prevista pela análise numérica mostra uma distribuição bem pontuda, em volta do espaçamento ótimo. Isso implica que, para se obter todos os benefícios de um único anel de campo flutuante, é essencial o controle preciso da dimensão W_m da máscara e a profundidade de junção da difusão. Em geral, isso pode ser facilmente conseguido, durante o projeto do dispositivo e a sua fabricação.

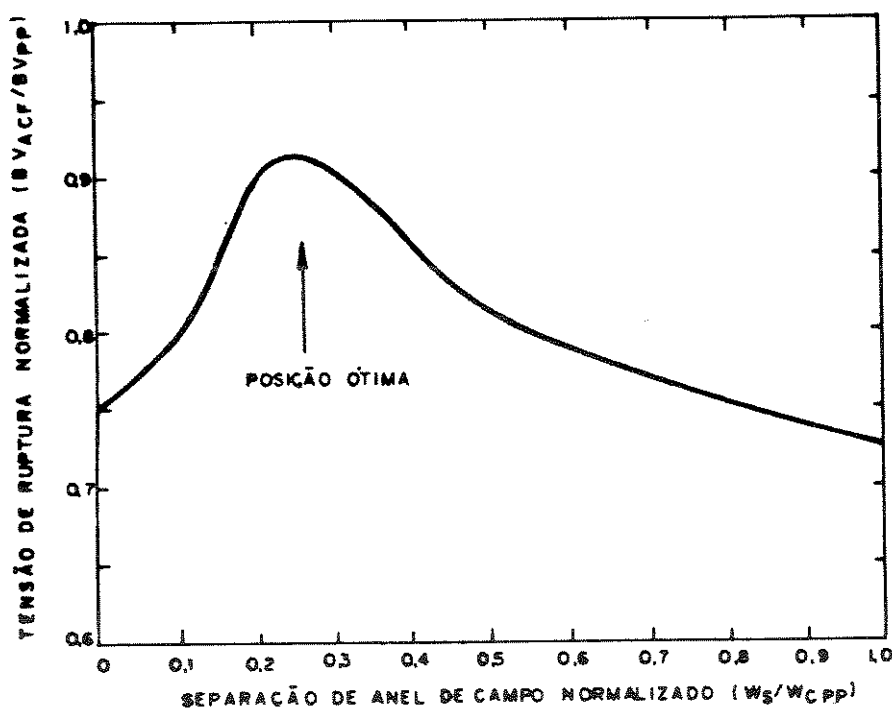


Figura I.11 - Efeito da posição do anel de campo flutuante em relação a junção principal sobre sua tensão de ruptura

O espaçamento ótimo, indicado na figura I.11, é baseado na suposição de que não há carga, na superfície do semiconductor, sobre a região levemente dopada. A presença de cargas na superfície tem uma forte influência sobre a distribuição da camada de depleção na superfície, já que esta carga complementa a carga existente devido os átomos aceitadores ionizados, dentro da camada de depleção. Na figura I.12 são mostrados os formatos da camada de depleção para os casos de carga de superfície positiva, zero e negativa, de uma junção planar. Para a junção cilíndrica ilustrada na figura I.12, a presença de cargas de superfície positivas irão causar uma diminuição na concentração das linhas de campo elétrico, e resultar na elevação da tensão de ruptura. O efeito

de cargas de superfície negativas será, obviamente, o oposto. Assim, cargas positivas são benéficas para a junção planar para simples com uma região P levemente dopada. No caso de junções com anéis de campo, entretanto, cargas de superfície de qualquer polaridade podem diminuir a tensão de ruptura, porque afetam a tensão de "punch-through" para o anel de campo flutuante. Isso altera o espaçamento e resulta na diminuição da tensão de ruptura devido a distribuição bem pontuda desta tensão em volta do espaçamento ótimo. Se a carga de superfície é precisamente conhecida, é possível conhecer a localização ótima do anel de campo flutuante, incluindo o efeito desta carga e, então, projetar o espaçamento W_m da máscara. Na prática, a carga na superfície do silício oxidado termicamente é positiva, na faixa de 10^{10} a $10^{12}/\text{cm}^2$. Mesmo com uma sequência de fabricação limpa e bem controlada de um dispositivo complexo, tal como um MOSFET de potência, a carga de superfície irá variar de wafer para wafer e, sobre um mesmo wafer, de $\pm 1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$. Isto representa uma limitação prática, inerente ao projeto da tensão de ruptura de dispositivos com o uso de um único anel de campo flutuante. Na figura I.13 tem-se as tensões de ruptura de junções com anéis de campo flutuante representadas por uma única linha. A tensão de ruptura de junções cilíndricas, sem o anel de campo flutuante, está incluída nesta figura, para efeito de comparação. Uma vez que o anel de campo flutuante pode ocupar um valioso espaço sobre a

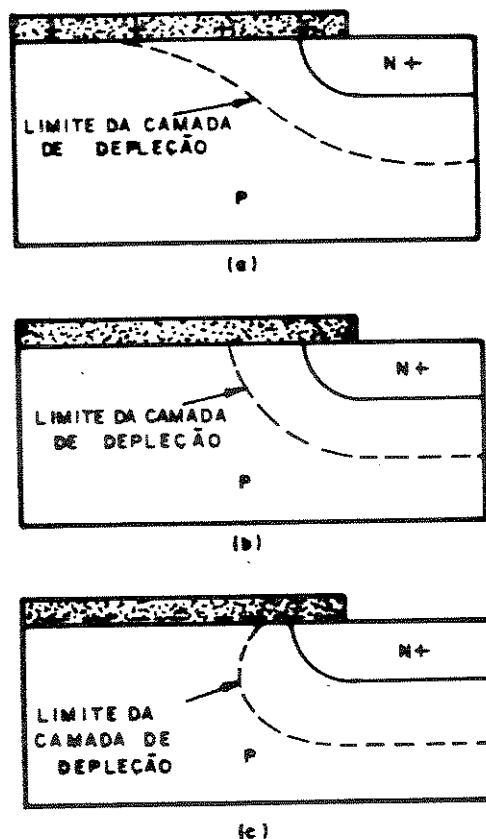


Figura I.12 - Influência da carga de superfície na distribuição da camada de depleção na borda de uma junção planar com (a) carga positiva; (b) carga zero; (c) carga negativa

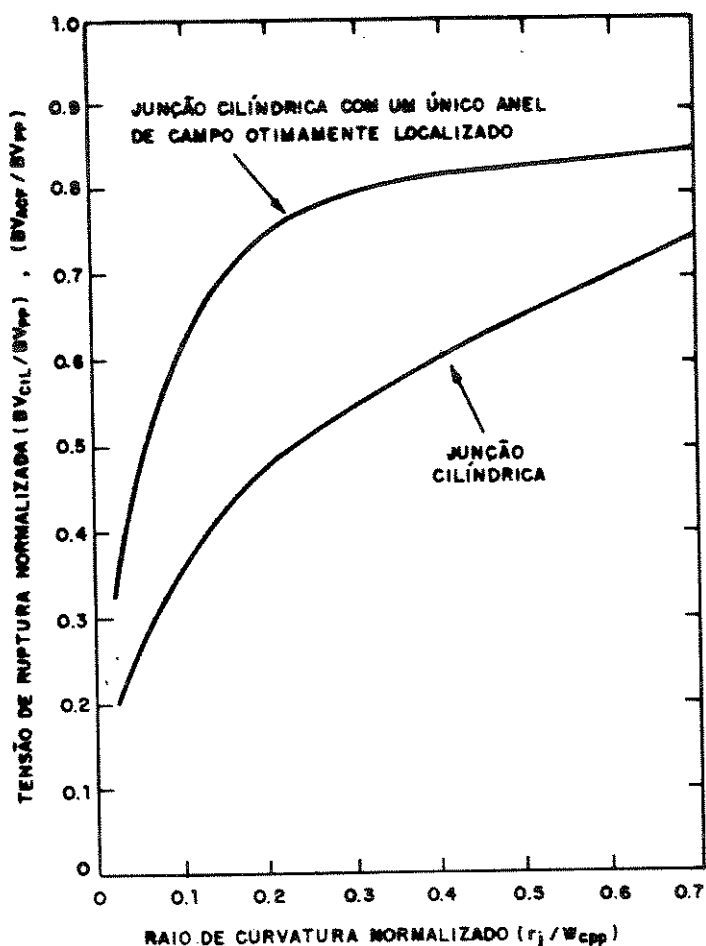


Figura I.13 - Tensão de ruptura normalizada de junções planares com um único anel de campo flutuante otimamente localizado

periferia do dispositivo e reduzir a área útil do mesmo, seu uso é mais comum em dispositivos pequenos, operando em baixas tensões (<1500V).

Outro parâmetro de projeto importante, é a largura W_f da janela, através da qual a região do anel flutuante é difundida para dentro do semiconductor. Se a largura W_f da janela é muito pequena, o anel de campo flutuante pode se tornar não efetivo na redução da curvatura da camada de depleção, mesmo quando estiver na localização ótima, o que está ilustrado na figura I.14a. Para ser efetivo na elevação da tensão de ruptura, é necessário fazer com que a largura do anel de campo flutuante seja comparável à largura da camada de depleção. Fazendo-se a largura do anel de campo flutuante muito maior do que a largura da camada de depleção, como mostrado na figura I.14b, além de não melhorar a tensão de ruptura, resulta em um desperdício de área na extremidade do dispositivo.

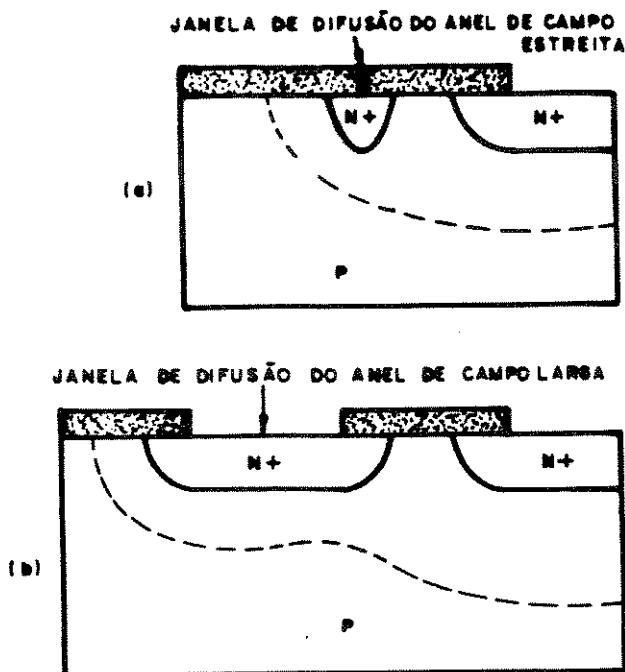


Figura I.14 - Efeito da largura do anel de campo flutuante sobre a concentração do campo elétrico (a) janela de difusão estreita (b) janela de difusão larga

I.3. Múltiplos Anéis de Campo Flutuante

Uma vez que um único anel de campo reduz a curvatura da camada de depleção e a concentração do campo elétrico, espera-se que vários anéis de campo flutuante, trabalhando em conjunto, possam elevar a tensão. Como no caso de um único anel de campo flutuante, múltiplos anéis de campo flutuante geralmente são fabricados com a junção principal, projetando-se a máscara com múltiplas janelas ao redor desta junção principal.

Existem duas filosofias de projeto para a terminação com múltiplos anéis de campo flutuante. Em um caso, o espaçamento entre anéis de campo flutuante é variado juntamente com sua largura. O espaçamento entre anéis de campo flutuante e a sua largura poderiam diminuir com o incremento da distância da junção principal, como ilustrado na figura I.15. Os anéis de campo mais distantes da junção podem ser mais estreitos, porque a profundidade da camada de depleção abaixo dos mesmos torna-se progressivamente menor, economizando, assim, área na periferia do dispositivo. Entretanto, esta aproximação é baseada na suposição de que a carga espacial de superfície é precisamente conhecida (os espaçamentos dos anéis de campo são projetados levando-se em consideração o efeito desta carga). Se a carga espacial de superfície do dispositivo real é mais positiva do que a assumida durante o projeto do dispositivo, os anéis de campo internos podem tornar-se não eficientes, transferindo toda a tensão para os anéis de campo externos, resultando em uma ruptura prematura no anel de campo mais externo. No caso ideal, todos os anéis de campo irão

compartilhar igualmente a tensão aplicada, produzindo ruptura por avalanche nas junções mais externas de todos estes anéis, simultaneamente.

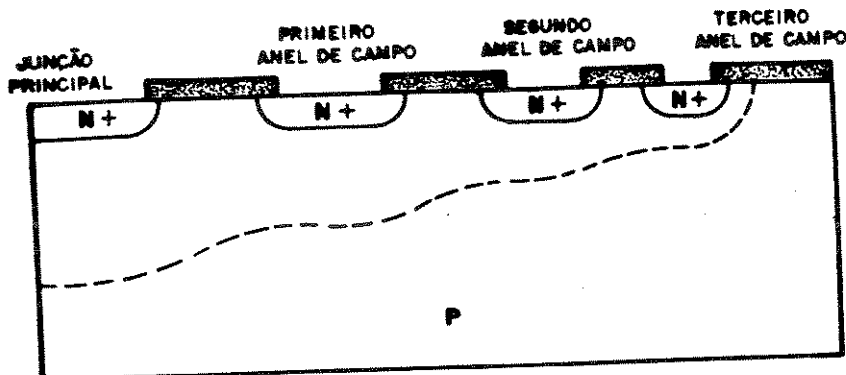


Figura I.15 - Terminação com múltiplos anéis de campo com a largura e o espaçamento dos anéis decrementando gradualmente

Na segunda alternativa de projeto, todos os anéis de campo flutuante são estreitos e igualmente espaçados. Devido a menor largura e menor espaçamento dos anéis, a maior parte dos mesmos pode ser acomodada dentro de uma dada área da extremidade do dispositivo, como mostrado na figura I.16, o que produz uma graduação muito melhor na camada de depleção nesta extremidade. O projeto desta terminação é mais fácil, porque é baseado no uso de regras de projeto mínimas para layout da largura e espaçamento dos anéis de campo. Esta terminação também é sensível às cargas de superfície. Porém, a presença de um maior número de anéis, reduz o impacto das variações da carga de superfície, quando comparado à primeira filosofia de projeto.

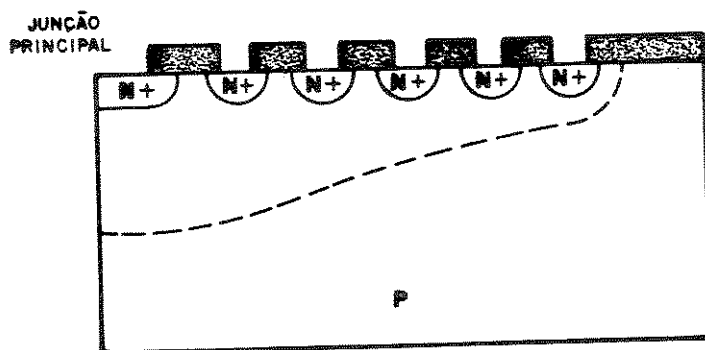


Figura I.16 - Terminação com múltiplos anéis de campo com largura e espaçamento iguais

A única limitação desta técnica reside na área ocupada na extremidade do dispositivo. Em dispositivos práticos, é comum usar três anéis de campo flutuante. Projetos com mais de 10 anéis são usados onde é importante conseguir tensões de ruptura próximas do caso da junção plana-paralela [1].

I.4. Junções Terminadas por meio de Abrasão Mecânica

Com a crescente aplicação de tiristores de estado sólido para controle de potência, existe uma constante necessidade do desenvolvimento de dispositivos de maior tensão [1]. No desenvolvimento de tiristores de alta tensão, é necessário projetar terminações de junções que permitam que a ruptura ocorra na junção e não nas bordas do dispositivo. Uma vez que estes dispositivos de grande área e alta tensão são fabricados usando-se difusões de gálio e alumínio, para se obter junções profundas e altamente graduadas, as técnicas de terminação de junção planar não são aplicáveis. A tecnologia de fabricação destes dispositivos envolve a confecção de junções planas e passivação das bordas [14].

A aproximação mais simples é fazer a borda do dispositivo perpendicular à superfície do "wafer". Isso pode ser feito serrando-se ou riscando-se e quebrando-se o "wafer", o que, entretanto, causa um considerável dano à superfície das bordas do dispositivo, tornando difícil a passivação. Além disso, descobriu-se que ao se cortar a extremidade do dispositivo com um certo ângulo, ocorria uma melhoria na tensão de ruptura.

Considere o caso de uma junção cuja área na extremidade diminui quando procedente do lado fortemente dopado para o lado levemente dopado. Esta terminação de junção é conhecida como uma junção com ângulo positivo de abrasão mecânica, e está ilustrada na figura I.17. O formato da camada de depleção e a correspondente distribuição de campo elétrico também estão indicados nesta figura. Para se manter o balanço de cargas sobre os lados opostos da junção, a camada de depleção sobre o lado levemente dopado da junção é forçada a se expandir para próximo da superfície. Esta expansão da camada de depleção causa uma redução na concentração do campo elétrico. Uma vez que a largura da camada de depleção ao longo da borda é muito maior do que no corpo, pode-se concluir que o campo elétrico ao longo da borda será bem menor do que no corpo. Este é um projeto ideal para a terminação de uma junção, porque assegura que a ruptura de corpo ocorra antes da ruptura na borda, se o campo elétrico na superfície da borda for suficientemente pequeno. Nota-se que, mesmo se o campo elétrico de superfície da borda for menor do que no corpo, a ruptura de superfície pode preceder a de corpo, porque os coeficientes de ionização na superfície são, geralmente, maiores do que no corpo, para o mesmo campo elétrico, devido a presença de defeitos na superfície.

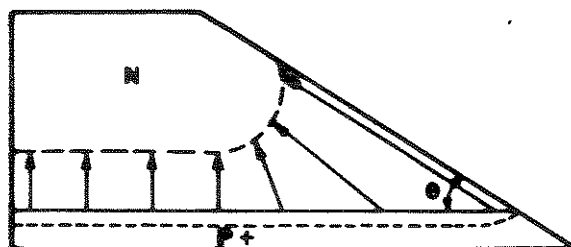


Figura I.17 - Contorno com ângulo positivo de abrasão mecânica

Se a borda da junção é cortada no sentido oposto, tal que a área da junção aumente quando procedente do lado fortemente dopado para o lado levemente dopado, a terminação é conhecida como uma junção com ângulo negativo de abrasão mecânica. O formato da camada de depleção para este caso está ilustrado na figura I.18. O estabelecimento do balanço de cargas sobre os lados opostos da junção faz com que a camada de depleção na superfície do lado levemente dopado diminua, enquanto que a camada de depleção sobre o lado fortemente dopado se expanda. Se o lado difundido da junção é fortemente dopado, a diminuição da camada de depleção sobre o lado levemente dopado terá influência dominante. Uma vez que o potencial da junção está sendo mantido por uma camada de depleção mais estreita na borda, pode-se esperar que os campos elétricos na borda sejam maiores do que no corpo. A ruptura de superfície irá preceder a de corpo na junção com ângulo negativo de abrasão mecânica, degradando suas características de ruptura. Contornos com ângulo negativo de abrasão mecânica são indesejáveis e podem ser evitados durante o processamento do dispositivo.

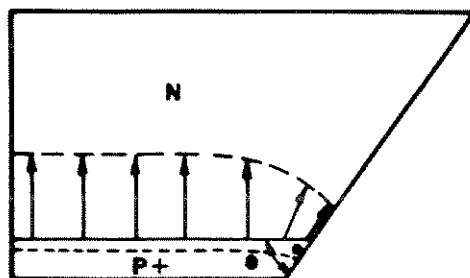


Figura I.18 - Contorno com ângulo negativo de abrasão mecânica

Uma exceção para este raciocínio ocorre se a junção é altamente graduada e possui um ângulo negativo de abrasão mecânica bem pequeno. Assim, o campo elétrico de superfície pode ser reduzido, como mostrado na figura I.19. Neste caso, a mudança gradual no nível de dopagem sobre o lado (p^+) da junção e a grande quantidade de material removido do lado difundido faz com que a camada de depleção se expanda consideravelmente, ao longo da superfície, sobre o lado difundido da junção. Esta expansão da

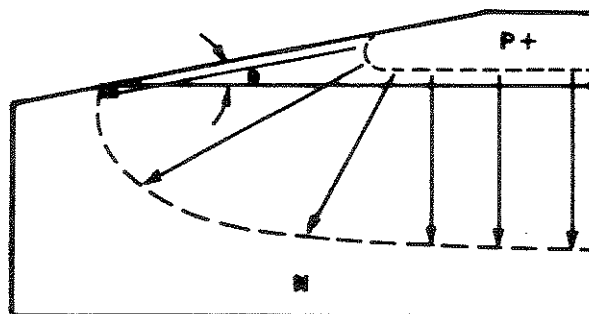


Figura I.19 - Junção com ângulo negativo raso de abrasão mecânica, com perfil de difusão altamente graduado

camada de depleção diminui o campo elétrico de superfície. Contornos de extremidade com ângulo negativo de abrasão mecânica são usados principalmente em dispositivos que contenham duas junções "back-to-back", como, por exemplo, tiristores de potência. Nestes casos, um ângulo positivo de abrasão mecânica é usado para a junção de bloqueamento reverso e o ângulo negativo de abrasão mecânica para a junção de bloqueamento direto.

Embora as terminações de junção com abrasão mecânica sejam muito usadas para a fabricação de retificadores e tiristores de grande área e alta tensão, não são usadas para dispositivos de pequena área.

I.4.1. Junção com Ângulo Positivo de Abrasão Mecânica

A junção com ângulo positivo de abrasão mecânica é aquela na qual a área da junção diminui quando procedente do lado fortemente dopado para o lado levemente dopado. Como um exemplo, alguns gráficos da distribuição de campo elétrico ao longo da superfície de uma junção típica, com vários ângulos de abrasão mecânica, estão mostrados na figura I.20. Desta análise, pode-se ver que o campo elétrico máximo ao longo da superfície é sempre menor do que o campo elétrico máximo no corpo, para todos os ângulos positivos. Quando se reduz o ângulo positivo de abrasão mecânica, o ponto no qual o campo elétrico máximo ocorre se desloca além da junção metalúrgica, para o interior do lado levemente dopado. De fato,

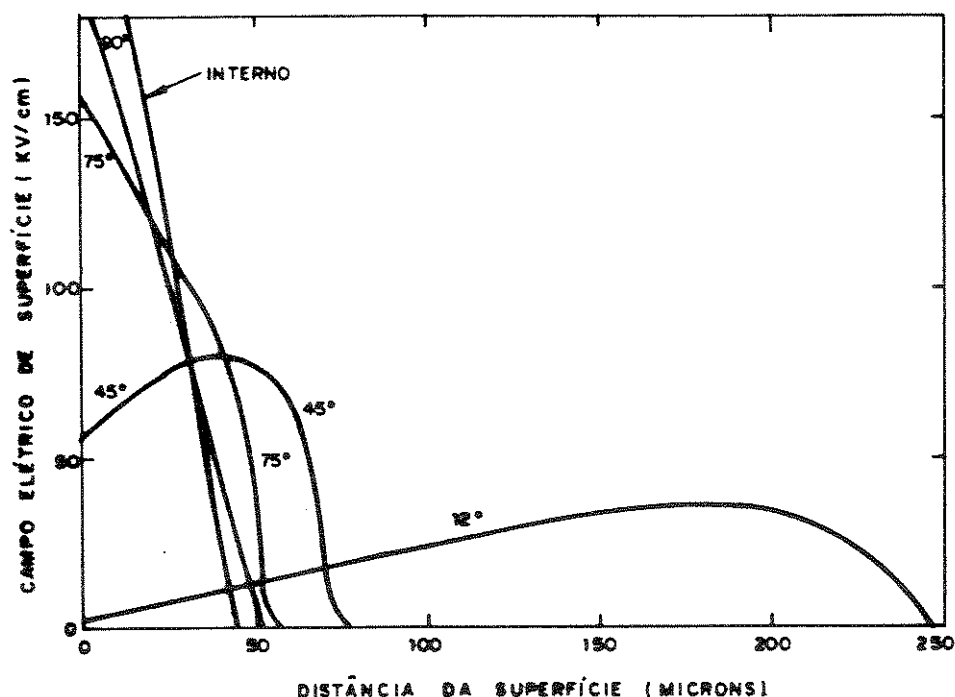


Figura I.20 - Distribuição de campo elétrico ao longo da superfície de uma junção com ângulo positivo de abrasão mecânica

pode-se ver, da figura I.20, que quando o ângulo positivo de abrasão mecânica se torna pequeno, a camada de depleção sobre o lado difundido das junções encontra a junção metalúrgica. Neste caso, o campo elétrico se aproxima de zero onde a junção metalúrgica encontra a superfície.

O campo elétrico máximo na superfície da junção com ângulo positivo de abrasão mecânica diminui com o decréscimo do ângulo de abrasão α . Esta junção possui as características ideais para se conseguir a ruptura de corpo. É importante salientar que esta é a única técnica de terminação do dispositivo, até agora desenvolvida, que consegue que a tensão de ruptura no corpo seja igual à tensão de ruptura da junção plana-paralela.

Embora a ruptura de corpo ocorra para uma junção com ângulo positivo de abrasão mecânica, se os coeficientes de ionização de impacto na superfície forem iguais aos do corpo, na prática é importante reduzir o campo elétrico de superfície máximo para pelo menos 50% do campo elétrico máximo no corpo, devido a presença de defeitos na superfície, que aumentam a ionização de impacto. Analisou-se o campo elétrico de superfície máximo para uma variedade de junções com ângulo positivo de abrasão mecânica, com diferentes níveis de dopagem de substrato e perfis de difusão, e concluiu-se que todos estes casos podem ser representados por uma única curva, usando-se um esquema de normalização similar ao adotado para a junção planar [15], normalizando-se em relação ao campo elétrico na porção plana paralela da junção. Esta curva é representada na figura I.21, de onde se pode concluir que, para assegurar a ruptura de corpo, são adequados ângulos positivos de abrasão mecânica variando de 30° a 60° . Ângulos positivos mais rasos não são recomendados, devido a perda de área na extremidade do dispositivo.

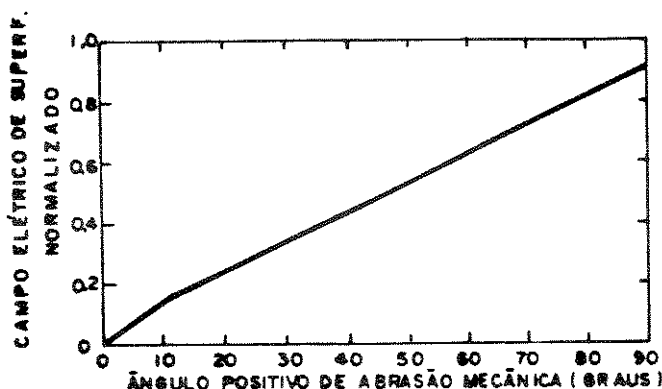


Figura I.21 - Campo elétrico de superfície normalizado como uma função do ângulo positivo de abrasão mecânica

I.4.2. Junção com Ângulo Negativo de Abrasão Mecânica

Em uma junção com ângulo negativo de abrasão mecânica, a área da junção diminui quando procedente do lado levemente dopado para o lado fortemente dopado. Foi ressaltado anteriormente, com a

ajuda da figura I.19, que o campo elétrico de superfície será reduzido abaixo do caso plano-paralelo para uma junção com ângulo negativo de abrasão, se o ângulo for pequeno e a difusão altamente graduada. A distribuição de campo elétrico ao longo da superfície de uma junção com ângulo negativo de abrasão está ilustrada na figura I.22, para vários ângulos. Pode-se ver que, quando o ângulo de abrasão mecânica diminui, a camada de depleção torna-se fixa sobre o lado levemente dopado na interface metalúrgica da junção P-N, enquanto a camada de depleção sobre o lado difundido continua a crescer, diminuindo, assim, o campo elétrico máximo na superfície, que ocorre sobre o lado difundido da junção, para pequenos ângulos de abrasão mecânica [16]. A variação do campo elétrico máximo em função do ângulo negativo de abrasão mecânica está ilustrada na figura I.23, para um caso específico (o mesmo da figura I.20). Note que o campo elétrico máximo de superfície é maior do que no corpo, para grandes ângulos negativos de abrasão mecânica. Isto ocorre devido a redução na largura da camada de depleção sobre o lado levemente dopado, como ilustrado na figura I.18, o que não ocorre na mesma proporção sobre o lado fortemente dopado. Isto somente ocorre quando o ângulo negativo de abrasão é muito pequeno, tal que o campo elétrico máximo de superfície torna-se menor do que o do corpo.

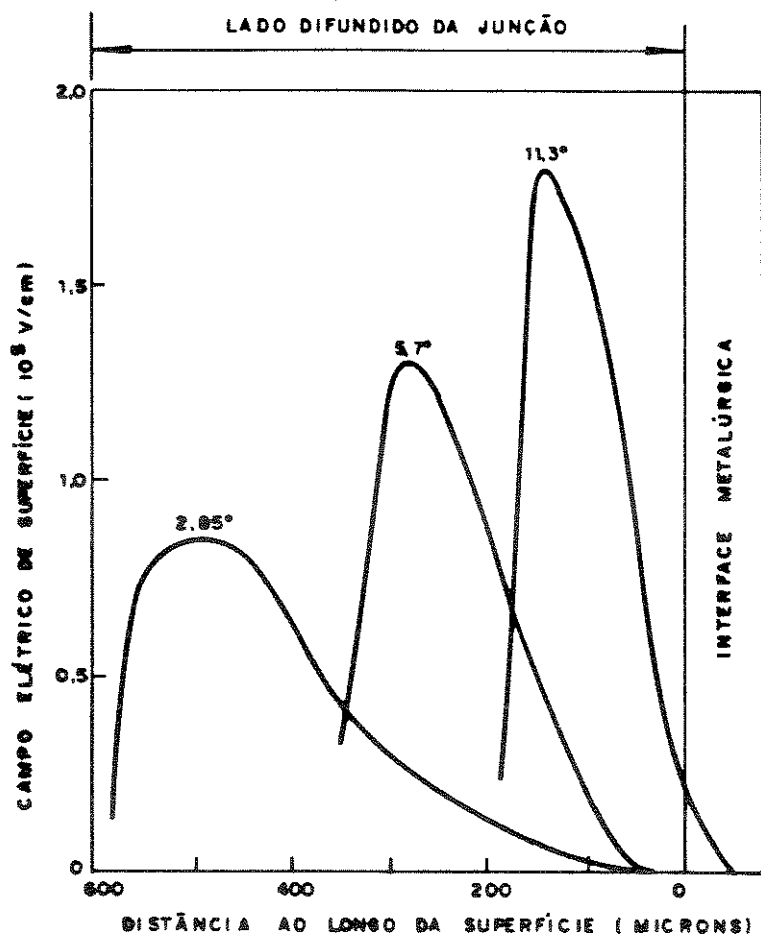


Figura I.22 - Exemplos de distribuição do campo elétrico de superfície para várias junções com ângulo negativo de abrasão mecânica

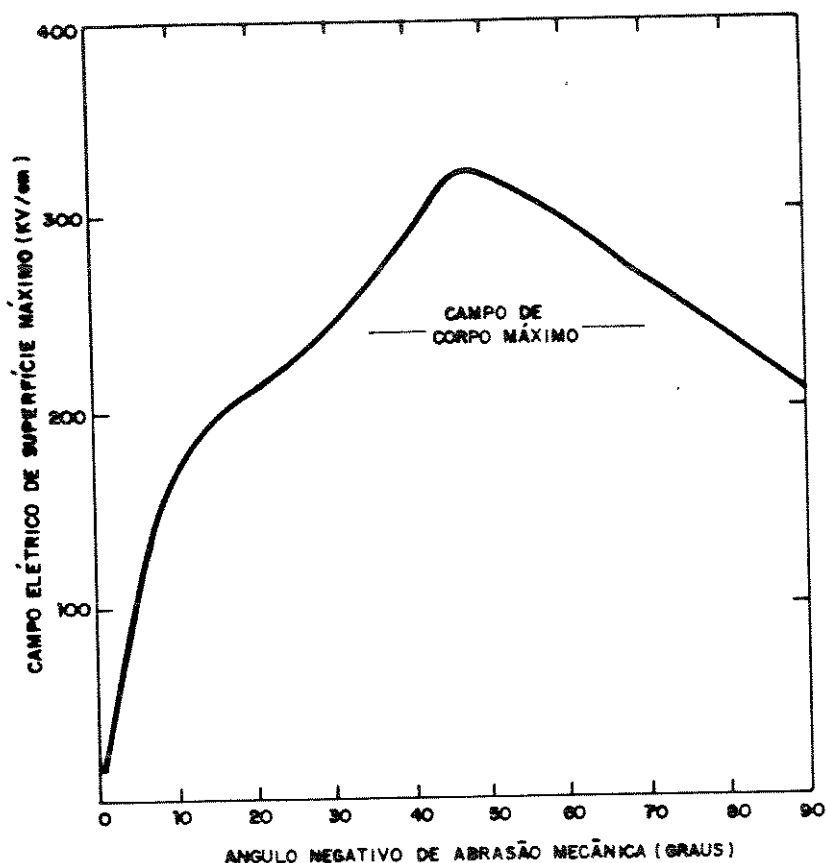


Figura I.23 - Variação do campo elétrico de superfície máximo com ângulo negativo de abrasão mecânica

Apesar da redução do campo elétrico máximo de superfície abaixo do campo elétrico de corpo, as tensões de ruptura de junções com ângulo negativo de abrasão mecânica não se igualam a tensão de ruptura da junção plana-paralela. O motivo disto é a ocorrência de um pico no campo elétrico sob a superfície [17]. A distribuição de campo elétrico da superfície para o corpo de uma junção com ângulo negativo de abrasão mecânica é mostrada na figura I.24 para um caso específico. Em todos os casos, o valor do campo elétrico é maior do que o do corpo. Isto implica que a tensão de ruptura de junções com ângulo negativo, será sempre menor do que a da junção plana-paralela.

Foram feitos vários cálculos numéricos para a tensão de ruptura em uma variedade de junções difundidas, com uma ampla faixa de concentrações de superfície e profundidades de junção, como uma função da dopagem de substrato e do ângulo negativo de abrasão mecânica [18]. Concluiu-se que as tensões de ruptura, para todos estes casos, podem ser representadas por uma única curva, com o uso de um esquema de normalização similar ao usado para junções difundidas planares. Neste caso, o parâmetro θ , denominado ângulo efetivo de abrasão mecânica, deve ser definido como:

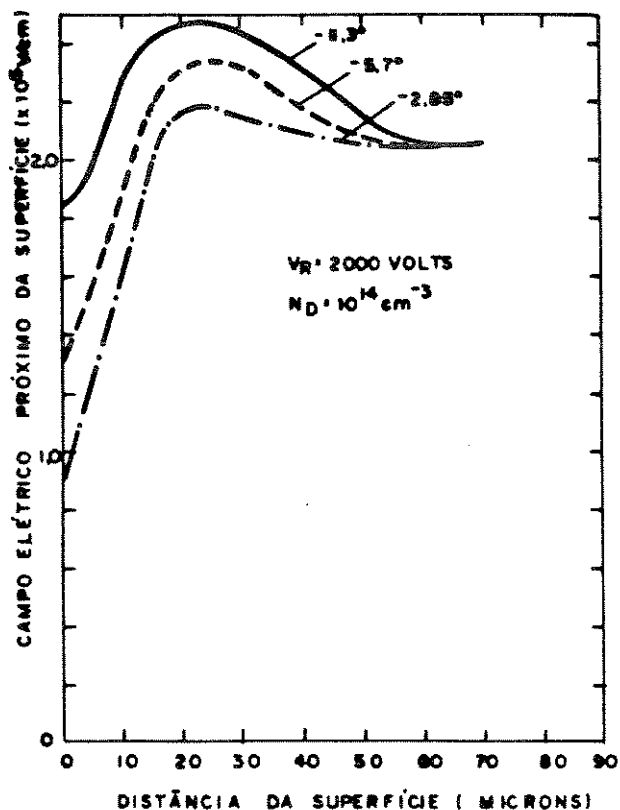


Figura I.24 - Distribuição do campo elétrico próximo da superfície de uma junção com ângulo negativo de abrasão mecânica

$$\theta = (0.04) \theta \left(\frac{W_L}{W_H} \right)^2 \quad (\text{I.26})$$

onde θ é o ângulo real de abrasão mecânica em graus e W_L e W_H são as larguras da camada de depleção sobre os lados levemente e fortemente dopados da junção, respectivamente. Uma curva representando a tensão de ruptura de junções com ângulo negativo de abrasão mecânica, normalizada para o caso plano-paralelo, está ilustrada na figura I.25a. Para se conseguir uma tensão de ruptura próxima do caso plano-paralelo, é necessário usar ângulos negativos de abrasão muito rasos, na faixa de 2 a 6 graus, para reduzir o campo elétrico de superfície, como mostrado na figura I.25b. Também é necessário conseguir uma junção altamente graduada que tenha uma pequena relação (W_L/W_H). Um tiristor de alta tensão (3000V), usa, tipicamente, um ângulo negativo de abrasão de 2 a 4 graus, com um gradiente de difusão que consegue uma relação (W_L/W_H) de 4 a 5. Isto resulta em uma tensão de ruptura de cerca de 90% do caso plano-paralelo.

Esta técnica requer o consumo de uma grande área nas junções do dispositivo, devido os rasos ângulos de abrasão mecânica necessários para reduzir o campo elétrico de superfície. A aplicação de um ângulo negativo de abrasão mecânica é, geralmente, confinada à dispositivos de alta-corrente e grande área.

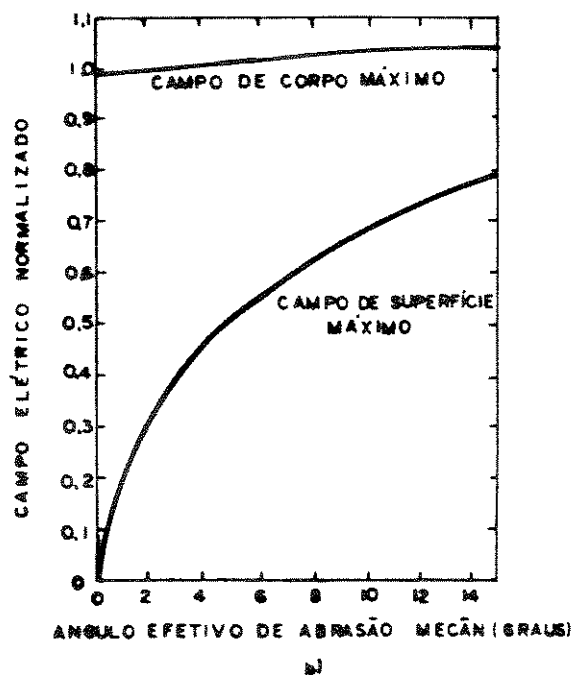
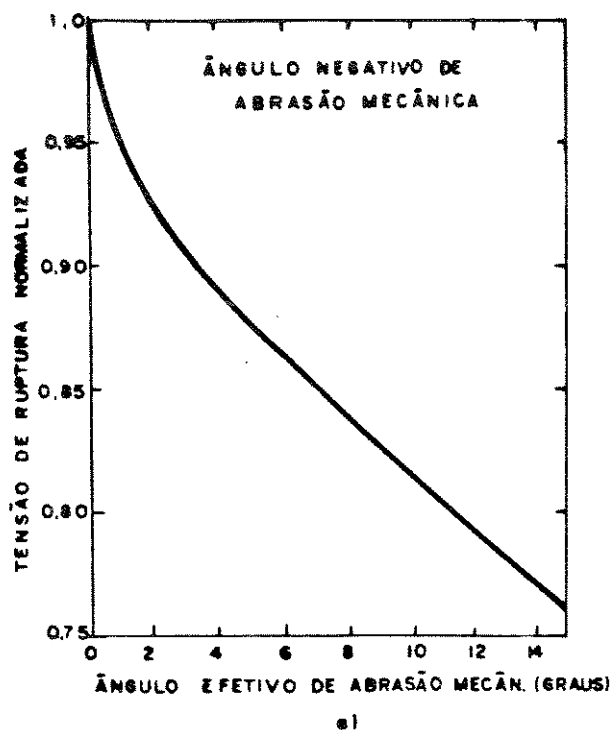


Figura I.25 - Gráficos normalizados de (a) tensão de ruptura e (b) campo elétrico máximo para junções com ângulo negativo de abrasão mecânica

I.5. Terminações do Tipo Contorno Decapado ("Etch Contour")

Desde o início do desenvolvimento de dispositivos de alta tensão, se conhece o conceito de decapagens químicas para remover

danos superficiais e melhorar a tensão de ruptura, ou reduzir a corrente de fuga de superfície. Um canal (deep moat) realizado por decapagem química, tal como mostrado na figura I.26, é também usado para terminação de dispositivos. Este canal também é muito usado para separação de dispositivos adjacentes. A decapagem é feita à nível do "wafer" pelo uso do material de máscara, tais como fotoresiste ou mesmo a própria metalização de alumínio. Só recentemente foi desenvolvida a aplicação científica de decapagem para reduzir o campo elétrico de superfície, pela precisa remoção de silício em certas áreas da junção P-N de alta tensão, próximas da superfície [19,20].

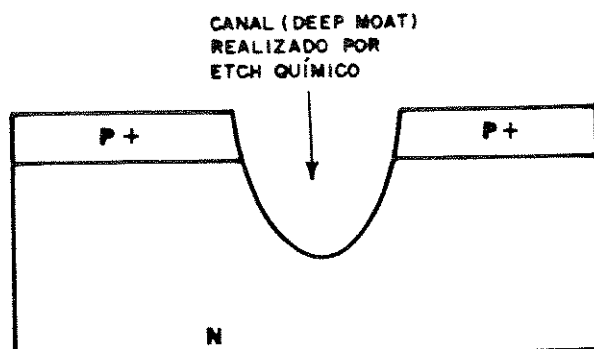


Figura I.26 - Contorno de um canal (deep moat) realizado por decapagem química

As soluções de ataque químico usadas na formação destes contornos decapados são misturas de ácido acético, hidrófluórico e nítrico. Para se regular a taxa de decapagem, a composição e temperatura do ácido devem ser cuidadosamente controladas. Em alguns contornos decapados, a profundidade deve ser controlada em $0,1\mu\text{m}$. Com o uso de decapagem química, é difícil conseguir uma boa uniformidade em todo o "wafer", com tal precisão. Com o advento de tecnologias "dry etch", tais como decapagem por plasma e "reactive ion", se consegue uma precisão muito maior para a profundidade de decapagem e a uniformidade. Além do mais, os processos "dry etching" são menos sensíveis à concentração de dopagem no silício do que as decapagens químicas.

As vantagens desta técnica residem no fato de se evitar contorno mecânico e de se conseguir tensões de ruptura próximas do caso ideal [21].

I.5.1. Contornos com Ângulo Positivo de Decapagem

Como no caso do ângulo positivo de abrasão mecânica descrito no item I.4, pelo uso de decapagem química, pode-se conseguir um efetivo ângulo positivo, removendo-se mais material do lado levemente dopado. De fato, com o uso de técnicas de decapagem, é possível remover material do lado levemente dopado da junção, sem a remoção de material do lado difundido ou altamente dopado. Exemplos de um contorno com ângulo positivo de decapagem para uma junção plana-paralela e uma junção difundida planar, estão ilustrados na figura I.27. Nos dois casos, a remoção seletiva de

material sobre o lado levemente dopado da junção na superfície, faz com que a camada de depleção sobre este lado se expanda. Isto pode resultar em uma redução significativa no campo elétrico de superfície máximo.

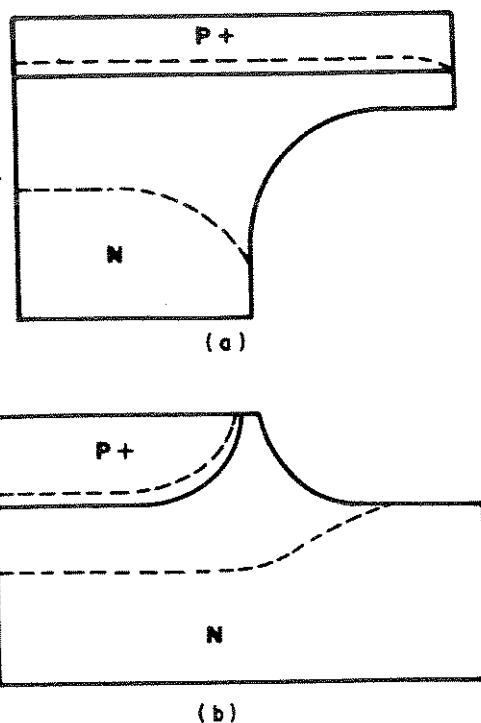


Figura I.27 - Contornos com ângulo positivo de abrasão química para (a) junção plana-paralela e (b) junção planar

As tensões de ruptura de junções planares com ângulo positivo de decapagem se aproximam do caso plano-paralelo em 90%. Sua maior vantagem é o menor campo elétrico de superfície, que facilita bastante a passivação de superfície e a estabilidade da tensão de ruptura. Além do mais, esta terminação é menos sensível às cargas de superfície, quando comparada à terminação anel de campo. Para se conseguir estes resultados, é importante controlar a localização do contorno decapado dentro de uns poucos microns.

I.5.2. Contornos com Ângulo Negativo de Decapagem

Como no caso da junção com ângulo negativo de abrasão mecânica, mais material é removido do lado altamente dopado de um contorno com ângulo negativo de decapagem, do que do lado levemente dopado. Exemplos deste tipo de terminação do dispositivo, estão ilustrados na figura I.28. Nos dois casos, a remoção de material do lado difundido da junção faz com que a camada de depleção se expanda, causando uma redução no campo elétrico de superfície máximo. Uma vez que a camada de depleção se estende em distâncias bem menores sobre o lado difundido da junção, o controle da profundidade de decapagem para o contorno com ângulo negativo de decapagem deve ser muito mais preciso do que para o contorno com ângulo positivo de decapagem.

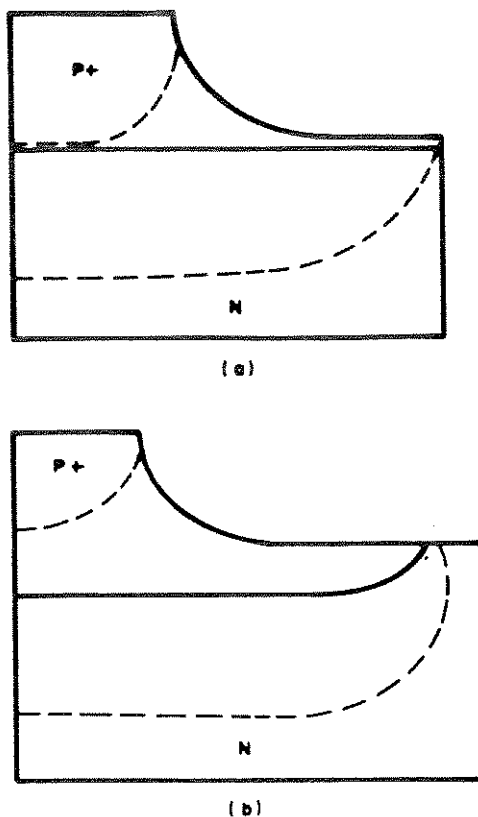


Figura I.28 - Contornos com ângulo negativo de abrasão química para (a) junção plana-paralela e (b) junção planar

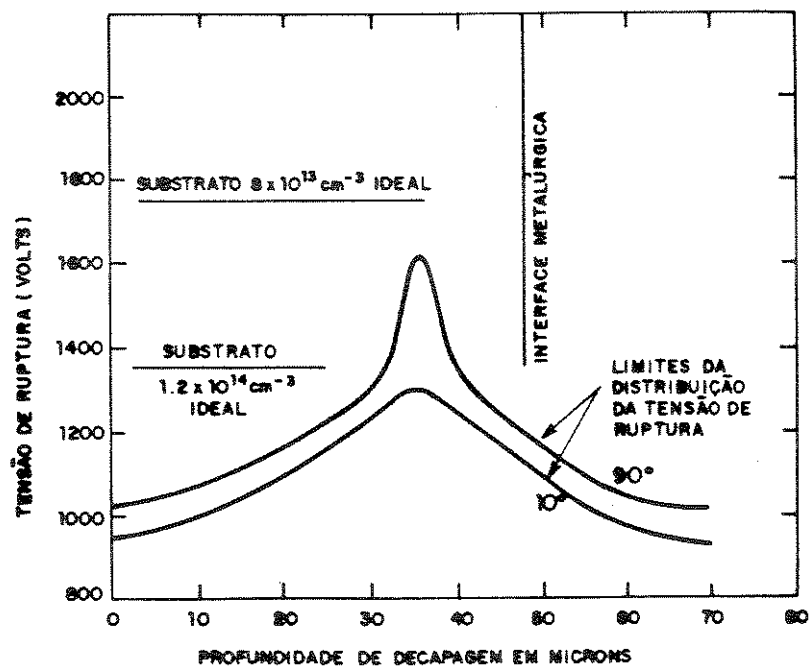


Figura I.29 - Impacto da profundidade da decapagem sobre a tensão de ruptura de um contorno com ângulo negativo de abrasão química

O controle muito preciso da profundidade de decapagem exigido pelo contorno com ângulo negativo está ilustrado na figura I.29. Pode-se ver que a tensão de ruptura tem um pico pronunciado e que a profundidade de decapagem deve ser controlada em $\pm 1\mu\text{m}$ para uma profundidade de junção de $35\mu\text{m}$. Este processo pode requerer controle e uniformidade em $\pm 3\%$ e, se isto é conseguido, a tensão de ruptura pode chegar a 90% do caso ideal.

I.6. Placas de Campo

Nas seções anteriores vimos que o campo elétrico na superfície de uma junção difundida planar é maior do que na junção plana-paralela, devido aos efeitos de curvatura da camada de depleção. A curvatura da camada de depleção pode ser controlada alterando-se o potencial de superfície. O método mais simples para isto, é colocar placa de campo de metal na extremidade da junção planar, como ilustrado na figura I.30. Pode-se ajustar o formato da camada de depleção, alterando-se o potencial sobre a placa de campo. Quando uma polarização positiva em relação ao substrato tipo N é aplicada à placa de campo de metal, ela irá atrair elétrons para a superfície e fazer com que a camada de depleção encolha, como ilustrado pelo caso A. Se uma polarização negativa é aplicada à placa de campo, ela irá afastar elétrons da superfície, fazendo com que a camada de depleção se expanda, como ilustrado pelo caso C. Sabe-se que a tensão de ruptura de um diodo com placa de campo está relacionada ao potencial desta placa, V_{FP} , por [1]:

$$V_D = m V_{FP} + \text{constante} \quad (\text{I.27})$$

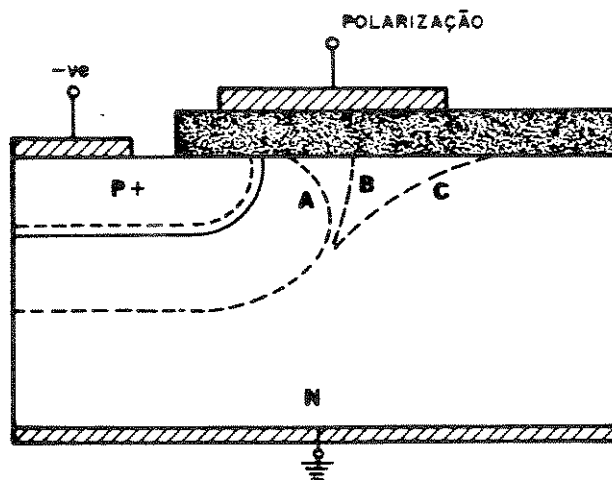


Figura I.30 - Junção planar com placa de campo na extremidade

onde $m=1$. O valor para m é próximo da unidade para pequenas espessuras do óxido. Com uma suficiente polarização sobre a placa de campo, a tensão do diodo planar pode se aproximar da tensão do diodo plano-paralelo.

É impraticável ter uma polarização separada em dispositivos para se controlar o potencial sobre a placa de campo. Ao invés disto, a placa de campo é criada simplesmente estendendo-se a metalização da junção sobre o óxido como mostrado na figura I.31. A presença da placa de campo no potencial da região de difusão faz com que a camada de depleção se estenda, na superfície, além da junção da placa de campo. Isto reduz a curvatura da camada de depleção e reduz o campo elétrico no ponto A. Entretanto, um alto campo elétrico pode ocorrer na junção da placa de campo no ponto B.

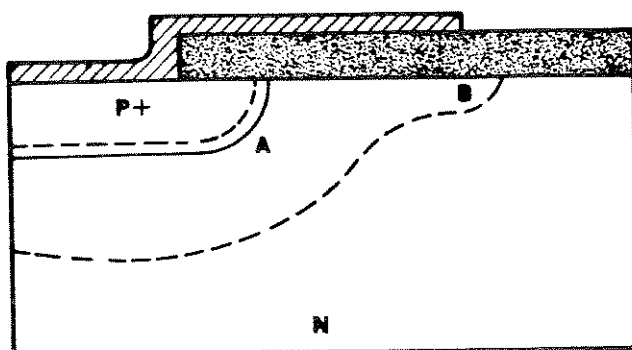


Figura I.31 - Junção planar com placa de campo formada pela extensão da metalização sobre o óxido na extremidade da junção

Foram feitas análises da distribuição de potencial para uma junção planar com uma placa de campo no lado fortemente dopado, para uma variedade de concentrações de dopagem do substrato e espessura do óxido [22]. As análises mostram um alto campo elétrico, na junção da placa de campo, se a espessura do óxido for pequena. O valor máximo da integral de ionização perto da junção da placa de campo é indicado na figura I.32. Nesta figura, a integral de ionização foi normalizada em relação ao valor da parte plana-paralela. O termo X_d é a largura da camada de depleção e, X_o é a espessura do óxido. Para se evitar a ruptura na junção da placa de campo, é necessário usar uma espessura de óxido suficientemente grande, tal que X_d/X_o seja menor do que 12. Entretanto, os resultados da figura I.32 não incluem o efeito de curvatura da junção metalúrgica. Quando a espessura do óxido aumenta, a influência da placa de campo sobre a curvatura da junção torna-se menor, e a ruptura pode ocorrer na junção metalúrgica, como resultado de um alto campo elétrico no ponto A, como no caso de uma junção planar sem a placa de campo. Uma espessura ótima para o óxido é, portanto, necessária para equilibrar o pico dos campos elétricos que ocorrem nos pontos A e B.

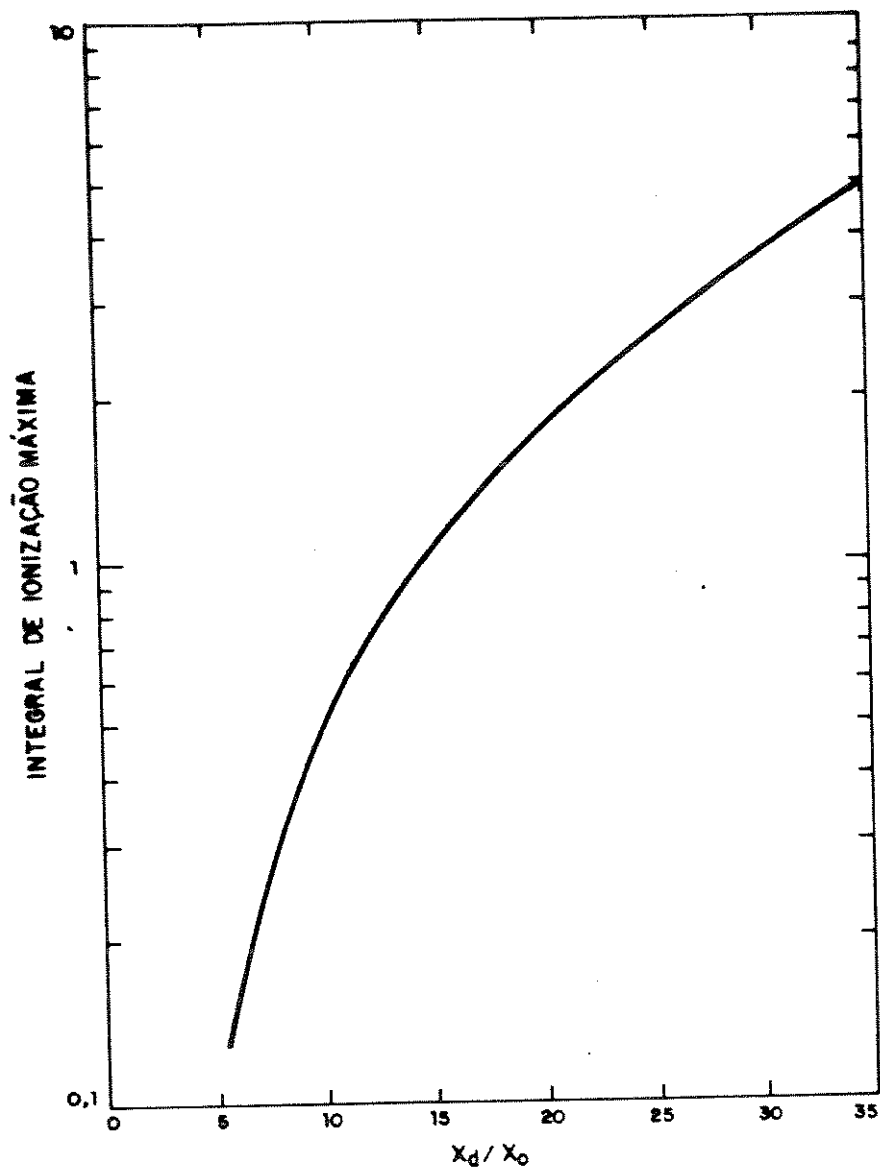


Figura I.32 - Integral de ionização máxima na extremidade de uma junção planar com placa de campo

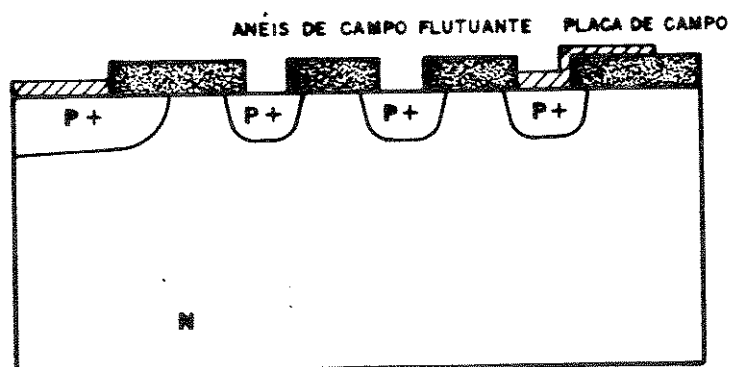


Figura I.33 - Terminação do dispositivo combinando anéis de campo flutuante com uma placa de campo

Uma alternativa para este compromisso é adaptar a espessura do óxido de pequenos valores perto da junção para maiores valores perto da junção da placa de campo. Isto requer um complexo processo de fabricação do dispositivo e, frequentemente, não garante um ganho na tensão de ruptura. Uma prática mais comum é usar a placa de campo em conjunto com anéis de campo flutuante, para se conseguir altas tensões, como ilustrado na figura I.33. A placa de campo é ligada ao último anel de campo flutuante, e se estende além da sua extremidade. As placas de campo não devem ser colocadas entre a junção principal e os anéis de campo flutuante ou entre anéis de campo flutuante adjacentes, porque irão transferir o potencial entre estas regiões e destruir a capacidade dos anéis de campo flutuante de aumentar a tensão.

I.7. Extensão da Terminação da Junção

Nas seções anteriores, sobre contornos feitos por abrasão mecânica e química, a tensão de ruptura foi aumentada pela remoção de material (e, conseqüentemente carga) tanto do lado fortemente dopado quanto do lado levemente dopado da junção. Pode-se conseguir um resultado similar pelo processo complementar, ou seja, pela adição de carga, precisamente controlada, na superfície. Esta aproximação foi denominada extensão da terminação da junção [23]. Esta terminação é dependente da habilidade de se introduzir cargas na superfície, próxima da junção, com uma exatidão melhor do que 1%, pelo uso de implantação de íons. O controle sobre a carga introduzida por implantação de íons é muito maior do que o que se consegue por técnicas de decapagem e pode se ter uma uniformidade bem melhor.

Exemplos de aplicação da técnica Extensão da Terminação da Junção para junções planar e plana-paralela estão ilustrados na figura I.34. A carga necessária para se obter altas tensões deve ser muito bem controlada. Se a dose da carga implantada é muito pequena, ela terá pequena influência sobre a distribuição de campo elétrico e o campo elétrico máximo irá ocorrer no ponto A, como no caso de uma terminação sem a extensão da terminação da junção. Se a dose da carga implantada é muito alta, a junção simplesmente

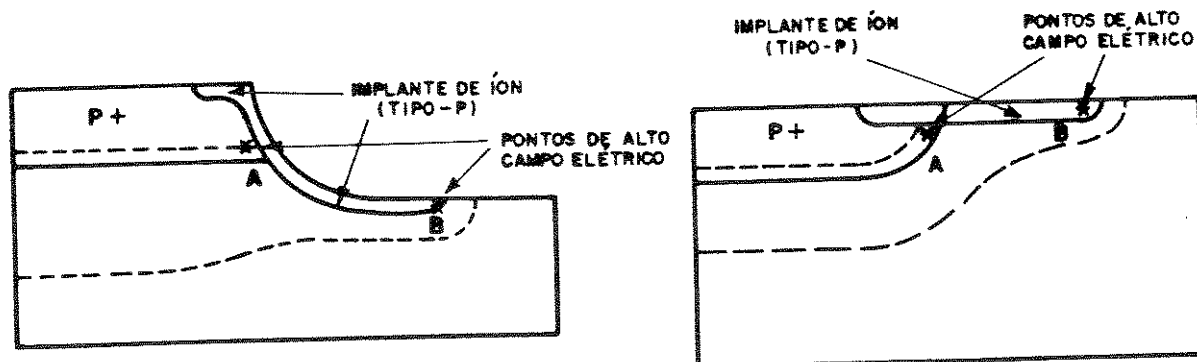


Figura I.34 - Extensão da terminação da junção aplicada para (a) junção plana-paralela e (b) junção planar

será estendida até o ponto B. Uma vez que a profundidade da região implantada por íon é pequena, a região de extensão terá um raio de curvatura muito pequeno. A terminação irá então romper como um resultado do alto campo elétrico no ponto B, como determinado pela ruptura da junção planar. Para se obter uma redução no campo elétrico e um incremento na tensão de ruptura, é essencial controlar a carga implantada tal que a região implantada se torne completamente depletada sob polarização reversa. Isto ocorre quando a dose de carga implantada varia de 60 a 80% da carga obtida tomando-se o produto da constante dielétrica do silício e o campo elétrico máximo, na ruptura, para o caso plano-paralelo. Com esta carga, consegue-se tensões de ruptura de 95% do caso plano-paralelo [1].

Embora esta técnica de terminação seja muito promissora para se conseguir tensões de ruptura próximas da ideal, dois problemas foram encontrados. Primeiro, a presença de cargas de superfície sobre a região implantada pode alterar fortemente a distribuição de campo elétrico. As doses ótimas de implantação de íons estão na faixa de 10^{11} a 10^{12} carga/cm², que são comparáveis as cargas de superfície que se originam dos processos típicos de passivação. Isto faz com que se originem altos campos elétricos nos pontos A e B e grandes variações na tensão de ruptura de dispositivo para dispositivo sobre um mesmo "wafer". Segundo, os altos campos elétricos próximos da superfície nos pontos A e B podem causar um excessivo fluxo de corrente de fuga. Entretanto, quando se consegue um controle adequado sobre a dose de implante, com a extensão da terminação da junção pode-se conseguir aproximadamente a tensão de ruptura ideal da junção plana-paralela, usando-se um processo compatível com o processamento moderno de dispositivos [24].

Capítulo II

A Terminação de Junção Utilizada

A Extensão da Terminação da Junção (JTE) [2] é uma das técnicas mais promissoras para o desenvolvimento de dispositivos de potência de alta tensão compatíveis com a tecnologia padrão de Circuito Integrado.

Do ítem Extensão da Terminação da Junção, do capítulo anterior, sabe-se que a técnica convencional de extensão é dependente da habilidade de se introduzir cargas na superfície próxima da junção, com uma precisão melhor do que 1% [1], pelo uso de implantação de íons. A carga necessária para se obter altas tensões de ruptura deve ser muito bem controlada.

Porém, neste trabalho, propõe-se a utilização de difusão em lugar da implantação, o que diminui o custo do dispositivo. Para se fabricar tais extensões da terminação da junção, foi desenvolvido um processo especial, onde conseguiu-se depositar cargas muito baixas, normalmente só conseguidas através de implantação de íons.

II.1. Processos de Difusão

A técnica em estudo consiste da pré-deposição de boro sobre o topo de uma camada de óxido de espessura bem controlada, usando dopantes de fonte sólida planar. Com o controle da espessura deste óxido crescido termicamente, pode-se controlar a quantidade de boro que efetivamente irá alcançar a superfície do silício, usando um processo convencional de pré-deposição à alta temperatura.

O controle da carga depositada não é tão preciso como no caso da implantação de íons, mas é o suficiente para permitir esta aplicação. É importante lembrar que, mesmo com técnicas de implantação de íon, a exatidão final da carga deixada no silício é afetada pela difusão (drive-in) que é feita após a implantação de íons, pois existe uma segregação do boro para o óxido sobre a região P⁻. Uma vez que dopantes de fonte sólida planar de última geração podem conseguir uma uniformidade de aproximadamente 1 por cento através do "wafer", a exatidão da carga de boro que será realmente depositada sobre a superfície do silício é basicamente uma função da espessura do óxido. Na figura II.1 é mostrada a relação entre a tensão de ruptura e a carga de boro líquida da região P⁻ depositada sobre um substrato tipo N com uma concentração de 10^{14} cm⁻³ e, na figura II.2, tem-se a relação entre a tensão de ruptura e o comprimento da região P⁻ [4].

Para a execução do processo aqui proposto, não é necessário nenhum passo crítico de processo, tal que se espera que a produção de dispositivos de potência de alta tensão usando esta técnica para extensões da terminação da junção tenha um bom rendimento.

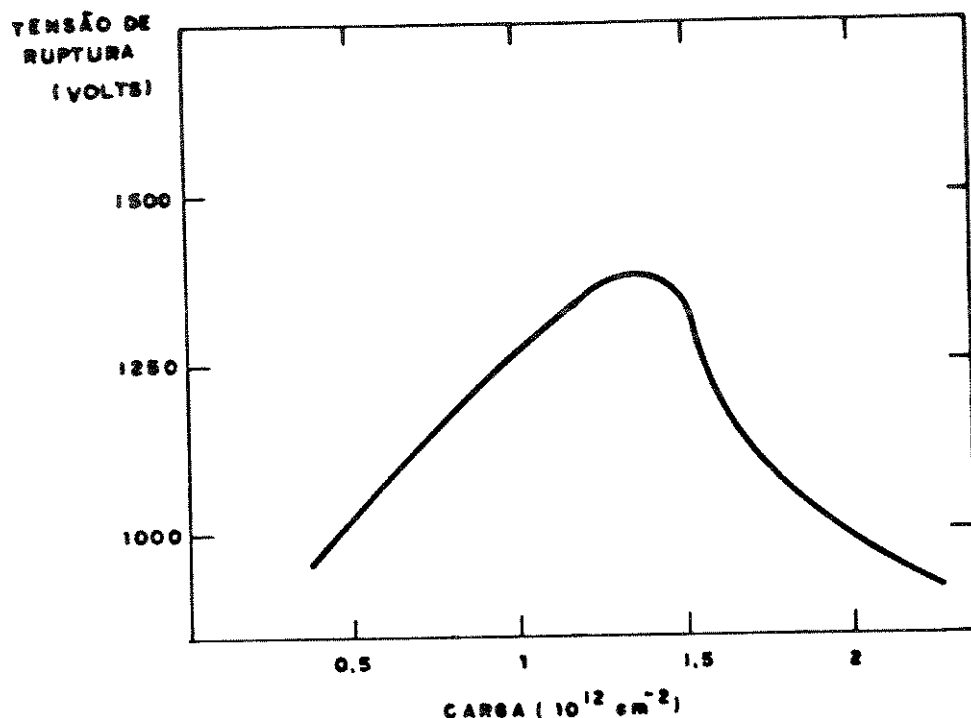


Figura II.1 - Tensão de ruptura em função da carga de boro depositada sobre a região P⁻ da extensão da terminação da junção

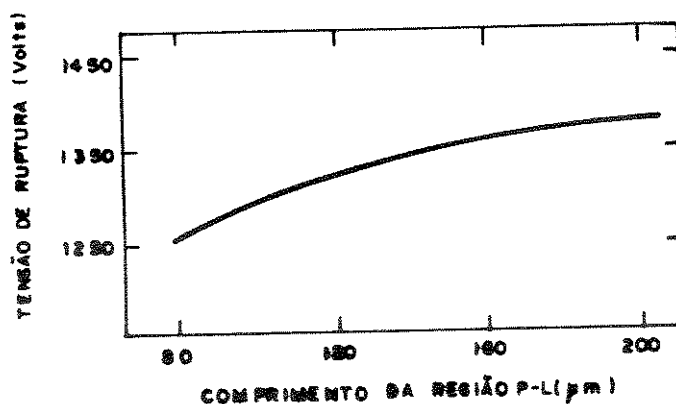


Figura II.2 - Tensão de ruptura em função do comprimento da região P⁻ da extensão da terminação da junção

Os passos de pré-deposição são feitos longos o suficiente para fazer com que o controle da carga de boro depositada sobre o silício seja basicamente uma função da espessura do óxido, que é um parâmetro não muito difícil de controlar.

Este trabalho foi aceito para publicação em Belgrade, Yugoslavia, MIEL 91 Conference, em maio de 1991 e, está apresentado no Apêndice A.

II.2. Projeto do Processo de Difusão e Resultados de Simulações

A estrutura utilizada consiste basicamente de uma junção principal, circundada por uma junção lateral, como indicado na figura II.3.

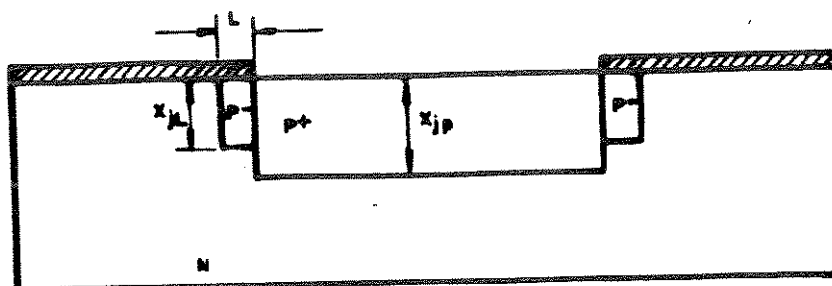


Figura II.3 - Estrutura do dispositivo com a extensão da terminação da junção utilizada

onde L é o comprimento da junção lateral
 X_{JL} é a profundidade da junção lateral
e X_{JP} é a profundidade da junção principal.

Os valores adotados para X_{JL} e X_{JP} são 5 e 7 μm , respectivamente, baseados em [5].

Além disto, outro parâmetro geométrico a ser controlado, baseado em [4], é o comprimento da junção lateral L . No caso, adotou-se $L=50, 100, 150$ e $200\mu\text{m}$ - Ver figura II.2, para se poder determinar a influência do valor de L na tensão de ruptura.

Outro fator muito importante a ser controlado é a carga a ser difundida nas junções laterais. De acordo com [4], adotou-se as seguintes doses implantadas : 0.5, 1.0, 1.5 e 2.0 $\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ - Ver figura II.3. Porém, necessita-se dos valores das cargas a serem difundidas. Para isto, com a utilização do simulador de processos SUPREM (Stanford University Process Modeling) [25], simulou-se implantações com as doses acima com o intuito de descobrir a carga equivalente. Os resultados destas simulações estão apresentados nas tabelas II.2, II.3, II.4 e II.5 e figuras II.4, II.5, II.6 e II.7. As equivalências encontradas entre as doses implantadas e as cargas ativas eletricamente estão apresentadas na tabela II.1.

DOSE IMPLANTADA ($\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$)	CARGA DIFUNDIDA ($\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$)
0,5	0,5
1,0	1,0
1,5	1,5
2,0	2,0

Tabela II.1 - Equivalência entre dose implantada e carga difundida

Ou seja, a dose a ser implantada, como esperado, é igual à carga a ser difundida nas junções laterais, já que todos os átomos estão ativos.

```

*** STANFORD UNIVERSITY PROCESS ENGINEERING MODELS PROGRAM ***
*** VERSION 0-05 ***
1....TITLE IMPLANTACAO - DOSE=0.5E12CM-2
2....GRID DYSI=0.02, DPTH=0.04, YMAX=8
3....SUBS ORNT=100, ELEM=P, CONC=2.6E14
4....PRINT HEAD=Y
5....PLOT WIND=5, CMIN=14, NDEC=6, TOTL=Y
6....STEP TYPE=IMPL, ELEM=B, DOSE=0.5E12, AKEV=50
7....END
STEP # 1 - IMPLANTACAO - DOSE=0.5E12CM-2 - RESULTADO FINAL
ION IMPLANT (PEARSON TYPE IV DISTRIBUTION)
IMPLANTED IMPURITY = BORON
IMPLANTED DOSE = 5.000000E+11 CM-2
IMPLANT ENERGY = 50.0000 KEV
RANGE = .158900
STANDARD DEVIATION = 5.510000E-02
PEAK CONCENTRATION = 3.470435E+16 ATOMS/CM3
SURFACE CONCENTRATION = 9.825438E+14 ATOMS/CM3

```

JUNCTION DEPTH		SHEET RESISTANCE	
.434330	MICRONS	29899.3	OHMS/SQUARE
		25484.6	OHMS/SQUARE

```

CHEMICAL CONCENTRATION OF BORON
OXIDE CHARGE = .000000 IS .000 % OF TOTAL
SILICON CHARGE = 5.000001E+11 IS 100. % OF TOTAL
TOTAL CHARGE = 5.000001E+11 IS .000 % OF INITIAL
INITIAL CHARGE = .000000

```

Tabela II.2 - Resultado da simulação de uma implantação para se achar a carga equivalente a uma dose de 0.5E12CM-2

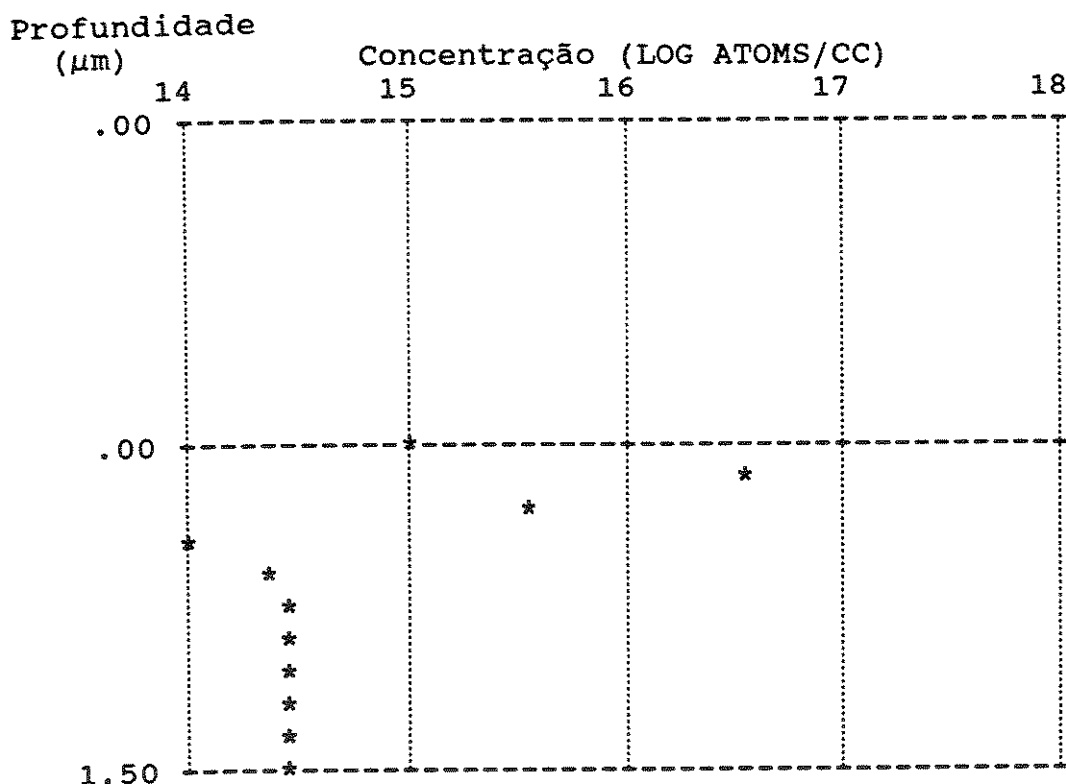


Figura II.4 - Gráfico Concentração x Profundidade equivalente à simulação SUPREM da tabela II.2

```

*** STANFORD UNIVERSITY PROCESS ENGINEERING MODELS PROGRAM ***
*** VERSION 0-05 ***
1....TITLE IMPLANTACAO - DOSE=1.0E12CM-2
2....GRID DYSI=0.02, DPTH=0.04, YMAX=8
3....SUBS ORNT=100, ELEM=P, CONC=2.6E14
4....PRINT HEAD=Y
5....PLOT WIND=5, CMIN=14, NDEC=6, TOTL=Y
6....STEP TYPE=IMPL, ELEM=B, DOSE=1.0E12, AKEV=50
7....END
STEP # 1 - IMPLANTACAO - DOSE=1.0E12CM-2 RESULTADO FINAL
ION IMPLANT (PEARSON TYPE IV DISTRIBUTION)
IMPLANTED IMPURITY = BORON
IMPLANTED DOSE      = 1.000000E+12 CM-2
IMPLANT ENERGY    = 50.0000 KEV
RANGE               = .158900
STANDARD DEVIATION = 5.510000E-02
PEAK CONCENTRATION = 6.940869E+16 ATOMS/CM3
SURFACE CONCENTRATION = 2.225088E+15 ATOMS/CM3
  JUNCTION DEPTH          SHEET RESISTANCE
-----
.469084      MICRONS      16178.2      OHMS/SQUARE
                25611.1      OHMS/SQUARE
CHEMICAL CONCENTRATION OF BORON
OXIDE CHARGE = .000000      IS      .000      % OF TOTAL
SILICON CHARGE = 1.000000E+12      IS      100.      % OF TOTAL
TOTAL CHARGE = 1.000000E+12      IS      .000      % OF INITIAL
INITIAL CHARGE = .000000
    
```

Tabela II.3 - Resultado da simulação de uma implantação para se achar a carga equivalente a uma dose de 1.0E12CM-2

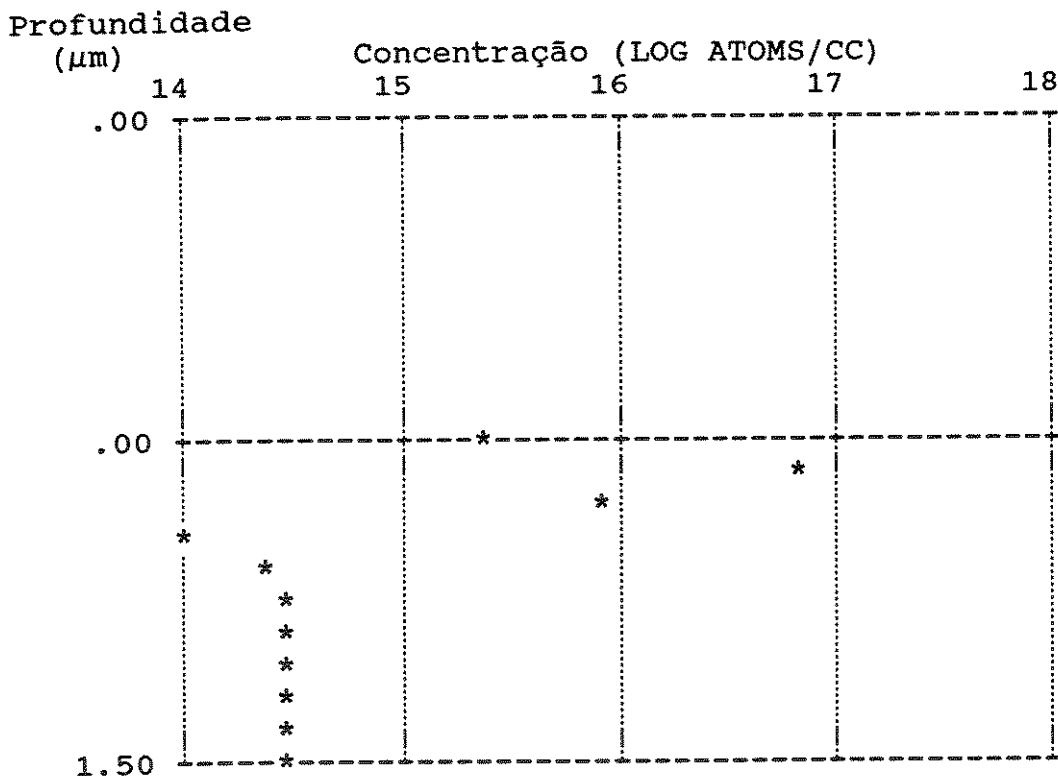


Figura II.5 - Gráfico Concentração x Profundidade equivalente à simulação SUPREM da tabela II.3

```

*** STANFORD UNIVERSITY PROCESS ENGINEERING MODELS PROGRAM ***
*** VERSION 0-05 ***
1....TITLE IMPLANTACAO - DOSE=1.5E12CM-2
2....GRID DYSI=0.02, DPTH=0.04, YMAX=8
3....SUBS ORNT=100, ELEM=P, CONC=2.6E14
4....PRINT HEAD=Y
5....PLOT WIND=5, CMIN=14, NDEC=6, TOTL=Y
6....STEP TYPE=IMPL, ELEM=B, DOSE=1.5E12, AKEV=50
7....END
STEP # 1 - IMPLANTACAO - DOSE=1.5E12CM-2 - RESULTADO FINAL
ION IMPLANT (PEARSON TYPE IV DISTRIBUTION)
IMPLANTED IMPURITY = BORON
IMPLANTED DOSE = 1.500000E+12 CM-2
IMPLANT ENERGY = 50.0000 KEV
RANGE = .158900
STANDARD DEVIATION = 5.510000E-02
PEAK CONCENTRATION = 1.041130E+17 ATOMS/CM3
SURFACE CONCENTRATION = 3.467632E+15 ATOMS/CM3
JUNCTION DEPTH | SHEET RESISTANCE
-----|-----
.487077 MICRONS | 11502.0 OHMS/SQUARE
| 25741.6 OHMS/SQUARE
CHEMICAL CONCENTRATION OF BORON
OXIDE CHARGE = .000000 IS .000 % OF TOTAL
SILICON CHARGE = 1.500000E+12 IS 100. % OF TOTAL
TOTAL CHARGE = 1.500000E+12 IS .000 % OF INITIAL
INITIAL CHARGE = .000000
    
```

Tabela II.4 - Resultado da simulação de uma implantação para se achar a carga equivalente a uma dose de 1.5E12CM-2

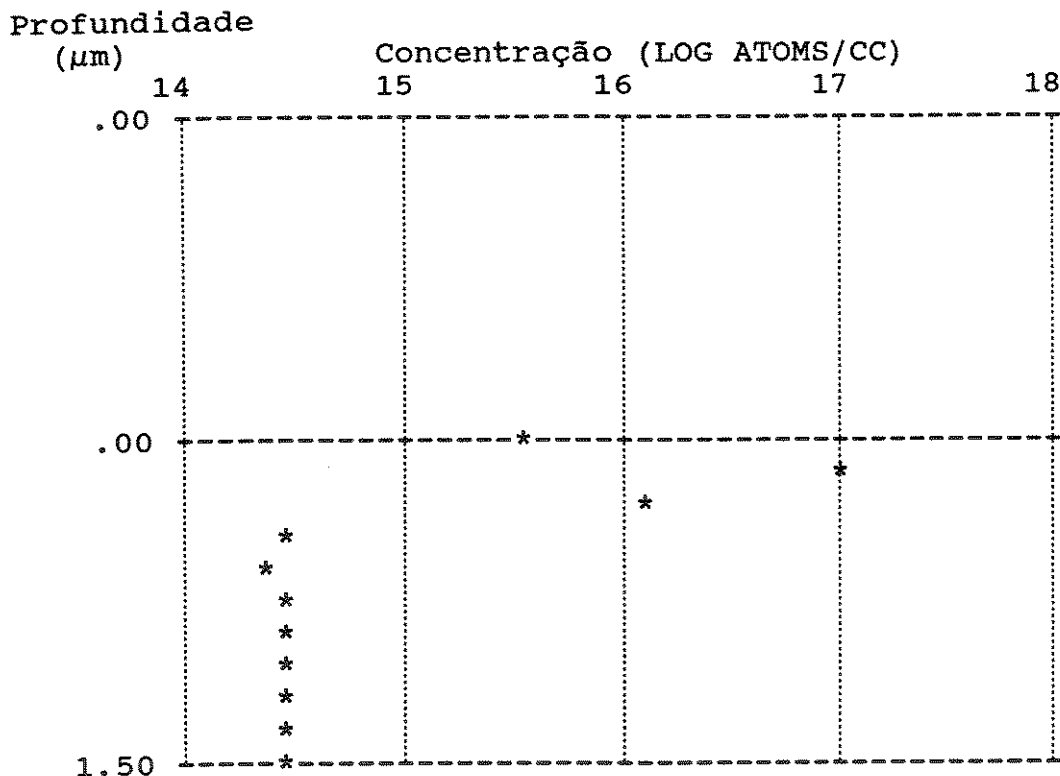


Figura II.6 - Gráfico Concentração x Profundidade equivalente à simulação SUPREM da tabela II.4

```

*** STANFORD UNIVERSITY PROCESS ENGINEERING MODELS PROGRAM ***
*** VERSION 0-05 ***
1....TITLE IMPLANTACAO - DOSE=2.0E12CM-2
2....GRID DYSI=0.02, DPTH=0.04, YMAX=8
3....SUBS ORNT=100, ELEM=P, CONC=2.6E14
4....PRINT HEAD=Y
5....PLOT WIND=5, CMIN=14, NDEC=6, TOTL=Y
6....STEP TYPE=IMPL, ELEM=B, DOSE=2.0E12, AKEV=50
7....END
STEP # 1 - IMPLANTACAO - DOSE=2.0E12CM-2 - RESULTADO FINAL
ION IMPLANT (PEARSON TYPE IV DISTRIBUTION)
IMPLANTED IMPURITY = BORON
IMPLANTED DOSE      = 2.000000E+12 CM-2
IMPLANT ENERGY    = 50.0000 KEV
RANGE               = .158900
STANDARD DEVIATION = 5.510000E-02
PEAK CONCENTRATION = 1.388174E+17 ATOMS/CM3
SURFACE CONCENTRATION = 4.710175E+15 ATOMS/CM3
  JUNCTION DEPTH          SHEET RESISTANCE
-----
.503089      MICRONS      9094.94      OHMS/SQUARE
                25742.5    OHMS/SQUARE
CHEMICAL CONCENTRATION OF BORON
OXIDE CHARGE = .000000      IS      .000      % OF TOTAL
SILICON CHARGE = 2.000000E+12      IS      100.      % OF TOTAL
TOTAL CHARGE = 2.000000E+12      IS      .000      % OF INITIAL
INITIAL CHARGE = .000000
    
```

Tabela II.5 - Resultado da simulação de uma implantação para se achar a carga equivalente a uma dose de 2.0E12CM-2

Profundidade

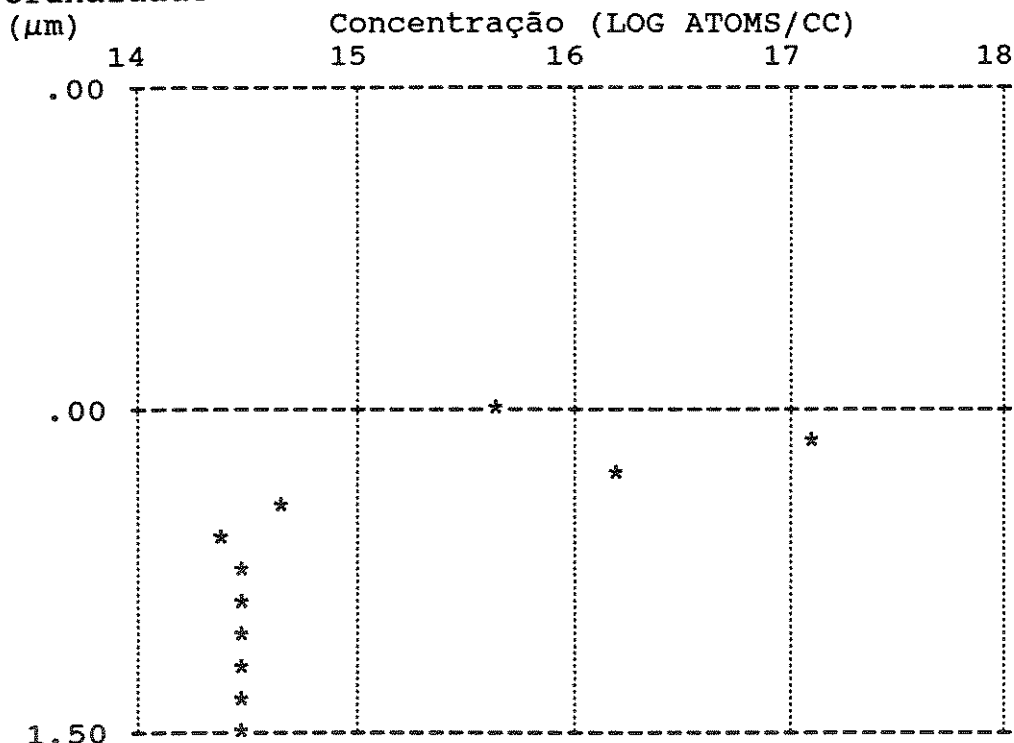


Figura II.7 - Gráfico Concentração x Profundidade equivalente à simulação SUPREM da tabela II.5

Com estes resultados, partiu-se para a simulação do dispositivo. O principal problema são as pequenas cargas a serem difundidas nas junções laterais. Com a simples pré-deposição e penetração de boro é impossível conseguir as cargas desejadas, como pode ser constatado pela simulação apresentada na tabela II.6 e figura II.8. Neste exemplo, fez-se uma pré-deposição de boro em 15 minutos e 900°C que, de acordo com o processo de deposição indicado pelo fabricante das fontes de difusão [26], equivale à menor carga possível. A carga resultante foi de $6.48 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Em seguida, fez-se a penetração desta carga por um tempo bem grande (600 minutos) e, a carga final, após esta etapa, foi de $2.88 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, que ainda é bastante grande em comparação com as cargas desejadas.

```

*** STANFORD UNIVERSITY PROCESS ENGINEERING MODELS PROGRAM ***
*** VERSION 0-05 ***
1....TITLE OBTENCAO DE UMA CARGA MINIMA DE BORO
2....GRID DYSI=0.02, DPTH=0.04, YMAX=8
3....SUBS ORNT=100, ELEM=P, CONC=2.6E14
4....PRINT HEAD=Y
5....PLOT WIND=5, CMIN=14, NDEC=6, TOTL=Y
6....STEP TYPE=PDEP, ELEM=B, CONC=1.2E20, TEMP=900, TIME=15
7....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=600, MODL=STMO
8....END
STEP # 2 - OBTENCAO DE UMA CARGA MINIMA DE BORO -
- RESULTADO FINAL
OXIDATION      IN      STEAM
TOTAL STEP TIME      = 600.0 MINUTES
INITIAL TEMPERATURE = 1150.00      DEGREES C.
OXIDE THICKNESS     = 2.521      MICRONS
LINEAR OXIDE GROWTH RATE = 8.890292E-02 MICRONS/MINUTE
PARABOLIC OXIDE GROWTH RATE = 1.111599E-02 MICRONS 2/MINUTE
OXIDE GROWTH PRESSURE = 1.00000      ATMOSPHERES
SURFACE CONCENTRATION = 9.582725E+16 ATOMS/CM 3

```

	OXIDE DIFFUSION COEFFICIENT	SILICON DIFFUSION COEFFICIENT	SEGREGATION COEFFICIENT	SURFACE TRANSPORT COEFFICIENT
PHOSPHORUS	1.83736E-05	4.54460E-03	10.000	8.07106E-02
BORON	5.98174E-07	3.03166E-03	.87961	2.73927E-02

JUNCTION DEPTH	SHEET RESISTANCE
6.59498 MICRONS	622.385 OHMS/SQUARE 6.275865E+06 OHMS/SQUARE


```

CHEMICAL CONCENTRATION OF BORON
OXIDE CHARGE = 4.850076E+14      IS      94.4      % OF TOTAL
SILICON CHARGE = 2.884174E+13     IS      5.61     % OF TOTAL
TOTAL CHARGE = 5.138494E+14      IS      79.3     % OF INITIAL
INITIAL CHARGE = 6.482759E+14

```

Tabela II.6 - Resultado da simulação para a obtenção de uma carga mínima de boro

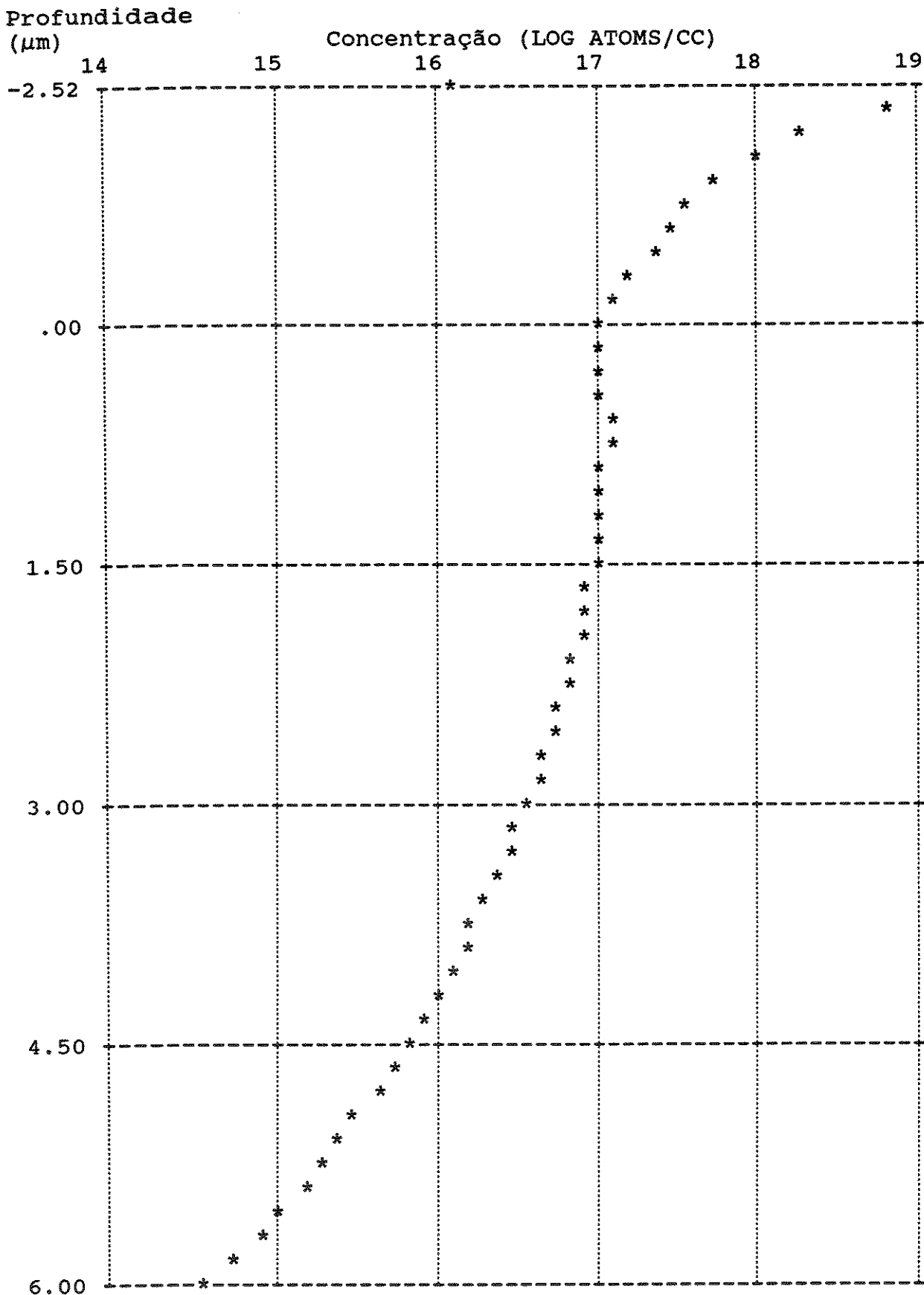


Figura II.8 - Gráfico Concentração x Profundidade equivalente à simulação SUPREM da tabela II.6

Os artifícios possíveis de serem utilizados, com o objetivo de se obter uma carga de boro bem pequena, são apresentados à seguir.

- A - Fazer uma decapagem química ou mecânica na lâmina, para se tirar o excesso de carga.

Este método, explicado anteriormente no Capítulo I, está sendo estudado no Led, como objeto de uma dissertação de mestrado [27].

Outras soluções, ainda não investigadas, que são aqui por nós propostas, são as seguintes:

- B - Fazer uma pré-deposição e uma penetração de fósforo antes da de boro, para um possível cancelamento de carga, ou seja, compensação de impurezas.

Depositou-se a menor carga de fósforo possível de acordo com o processo indicado pelos fabricantes de fontes sólidas e, ainda assim, esta foi bem maior que a carga de boro, anulando-a. Portanto, não se conseguiu o controle, como pode ser visto na tabela II.7 e figura II.9. A sequência executada neste ítem, foi a seguinte:

- Pré-deposição de fósforo em 15 minutos e 950°C, que equivale à menor carga possível com este processo, o que resulta em:
Carga de Fósforo = $7.79 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$
- Penetração desta carga em 620 minutos e 1250°C, o que resulta em:
Carga de Fósforo = $6.58 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$
- Pré-deposição de boro em 600 minutos e 950°C, o que resulta em:
Carga de Boro=0
- Penetração do boro em 55 minutos e 1250°C, em que a carga de boro continua nula.

*** STANFORD UNIVERSITY PROCESS ENGINEERING MODELS PROGRAM ***
 *** VERSION 0-05 ***

1....TITLE AJUSTE DE CARGA - DEPOSICAO ANTERIOR DE FOSFORO
 2....GRID DYSI=0.02, DPTH=0.04, YMAX=8
 3....SUBS ORNT=100, ELEM=P, CONC=2.6E14
 4....PRINT HEAD=Y
 5....PLOT WIND=5, CMIN=14, NDEC=6, TOTL=Y
 6....COMM DEPOSICAO ANTERIOR DE FOSFORO
 7....STEP TYPE=PDEP, ELEM=P, TEMP=950, TIME=15
 8....STEP TYPE=ETCH
 9....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=10, MODL=DRYO
 10....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=600, MODL=STMO
 11....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=10, MODL=NITO
 12....COMM DEPOSICAO DE BORO
 13....STEP TYPE=PDEP, ELEM=B, TEMP=950, TIME=600, CONC=1.2E20
 14....STEP TYPE=ETCH
 15....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=10, MODL=DRYO
 16....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=35, MODL=STMO
 17....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=10, MODL=NITO
 18....END

AJUSTE DE CARGA - DEPOSICAO ANTERIOR DE FOSFORO

STEP # 10 - DEPOSICAO DE BORO - RESULTADO FINAL

NEUTRAL AMBIENT DRIVE-IN

TOTAL STEP TIME = 10.0 MINUTES
 INITIAL TEMPERATURE = 1250.00 DEGREES C.
 OXIDE THICKNESS = .7452 MICRONS
 SURFACE CONCENTRATION = -1.157509E+19 ATOMS/CM 3

	OXIDE DIFFUSION COEFFICIENT	SILICON DIFFUSION COEFFICIENT	SEGREGATION COEFFICIENT	SURFACE TRANSPORT COEFFICIENT
PHOSPHORUS	1.19660E-04	1.79134E-02	10.000	.23421
BORON	3.95872E-06	1.54083E-02	1.4706	.10339

JUNCTION DEPTH

SHEET RESISTANCE

10.6839 OHMS/SQUARE

CHEMICAL CONCENTRATION OF PHOSPHORUS

OXIDE CHARGE = 1.228977E+14 IS 1.87 % OF TOTAL
 SILICON CHARGE = 6.443636E+15 IS 98.1 % OF TOTAL
 TOTAL CHARGE = 6.566534E+15 IS 100. % OF INITIAL
 INITIAL CHARGE = 6.568502E+15

CHEMICAL CONCENTRATION OF BORON

OXIDE CHARGE = .000000 IS .000 % OF TOTAL
 SILICON CHARGE = .000000 IS .000 % OF TOTAL
 TOTAL CHARGE = .000000 IS .000 % OF INITIAL
 INITIAL CHARGE = .000000

Tabela II.7 - Resultado da simulação para um ajuste de carga com uma deposição anterior de fósforo

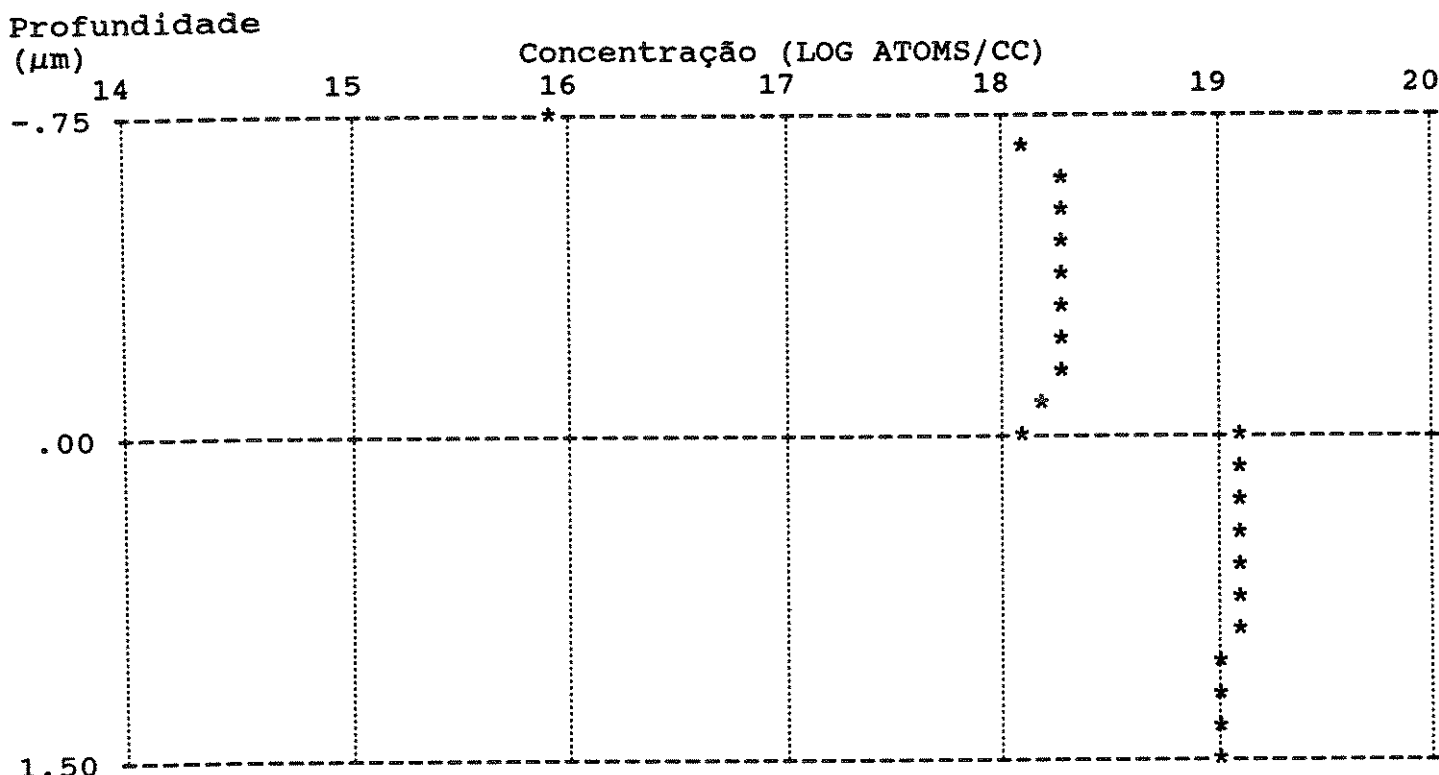


Figura II.9 - Gráfico Concentração x Profundidade equivalente à simulação SUPREM da tabela II.7

- C - Fazer somente uma oxidação antes da pré-deposição de boro, para também se tentar um cancelamento de carga.

Aqui, entretanto, os resultados encontrados foram muito bons. A sequência executada neste item, foi a seguinte:

- Oxidação para formação de barreira
- Deposição lateral de boro
- Penetração da junção lateral
- Deposição de boro da junção central
- Penetração da junção central

No final de todo este processo, é importante o controle da carga da junção lateral em 0.5, 1.0, 1.5 e $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Neste caso, foram feitos dois tipos de simulação: uma para a junção central e uma para a junção lateral. Porém, na simulação da junção lateral, tem-se que levar em consideração o efeito provocado pela pré-deposição e penetração da junção central, pois altera a carga final de boro e a profundidade da junção lateral. A simulação da deposição da junção central após a junção lateral foi feita com Nitrogênio, para evitar a oxidação durante este processo.

Uma observação a ser feita, é que o óxido final não deve ultrapassar $1 \mu\text{m}$, para não dificultar o trabalho de fotolitografia.

Os resultados finais obtidos são apresentados à seguir:

Simulação da Junção Central - tabela II.8 e figura II.10

- Pré-deposição de boro em 90 minutos e 950°C
- Penetração da junção central em 390 minutos e 1150°C

Resultados obtidos:

espessura do óxido = 0.6905 μ m
 profundidade da junção = 6.55709 μ m
 carga de boro = 1.09x10¹⁵cm⁻²

```

*** STANFORD UNIVERSITY PROCESS ENGINEERING MODELS PROGRAM ***
*** VERSION 0-05 ***
1....TITLE JUNCAO CENTRAL
2....GRID DYSI=0.02, DPTH=0.04, YMAX=12
3....SUBS ORNT=100, ELEM=P, CONC=2.6E14
4....PRINT HEAD=Y
5....PLOT WIND=12, CMIN=14, NDEC=10, TOTL=Y
6....COMM DEPOSICAO CENTRAL
7....STEP TYPE=PDEP, ELEM=B, TEMP=950, TIME=90, CONC=1.2E20
8....COMM PENETRACAO CENTRAL DE 8UM
9....STEP TYPE=ETCH
10....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=10, MODL=DRYO
11....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=50, MODL=STMO
12....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=330, MODL=NITO
13....END
STEP # 5 - JUNCAO CENTRAL - RESULTADO FINAL
NEUTRAL AMBIENT DRIVE-IN
TOTAL STEP TIME      = 330.0 MINUTES
INITIAL TEMPERATURE = 1150.00      DEGREES C.
OXIDE THICKNESS     = .6905        MICRONS
SURFACE CONCENTRATION = 5.667561E+18  ATOMS/CM  3

```

	OXIDE DIFFUSION COEFFICIENT	SILICON DIFFUSION COEFFICIENT	SEGREGATION COEFFICIENT	SURFACE TRANSPORT COEFFICIENT
PHOSPHORUS	1.83736E-05	2.52478E-03	10.000	8.07106E-02
BORON	5.98174E-07	2.46200E-03	.87961	2.73927E-02

JUNCTION DEPTH	SHEET RESISTANCE
6.55709 MICRONS	56.2921 OHMS/SQUARE
	39725.9 OHMS/SQUARE

CHEMICAL CONCENTRATION OF BORON

OXIDE CHARGE =	1.321330E+15	IS	54.7	% OF TOTAL
SILICON CHARGE =	1.096306E+15	IS	45.3	% OF TOTAL
TOTAL CHARGE =	2.417636E+15	IS	99.3	% OF INITIAL
INITIAL CHARGE =	2.434039E+15			

Tabela II.8 - Resultado da simulação da junção central

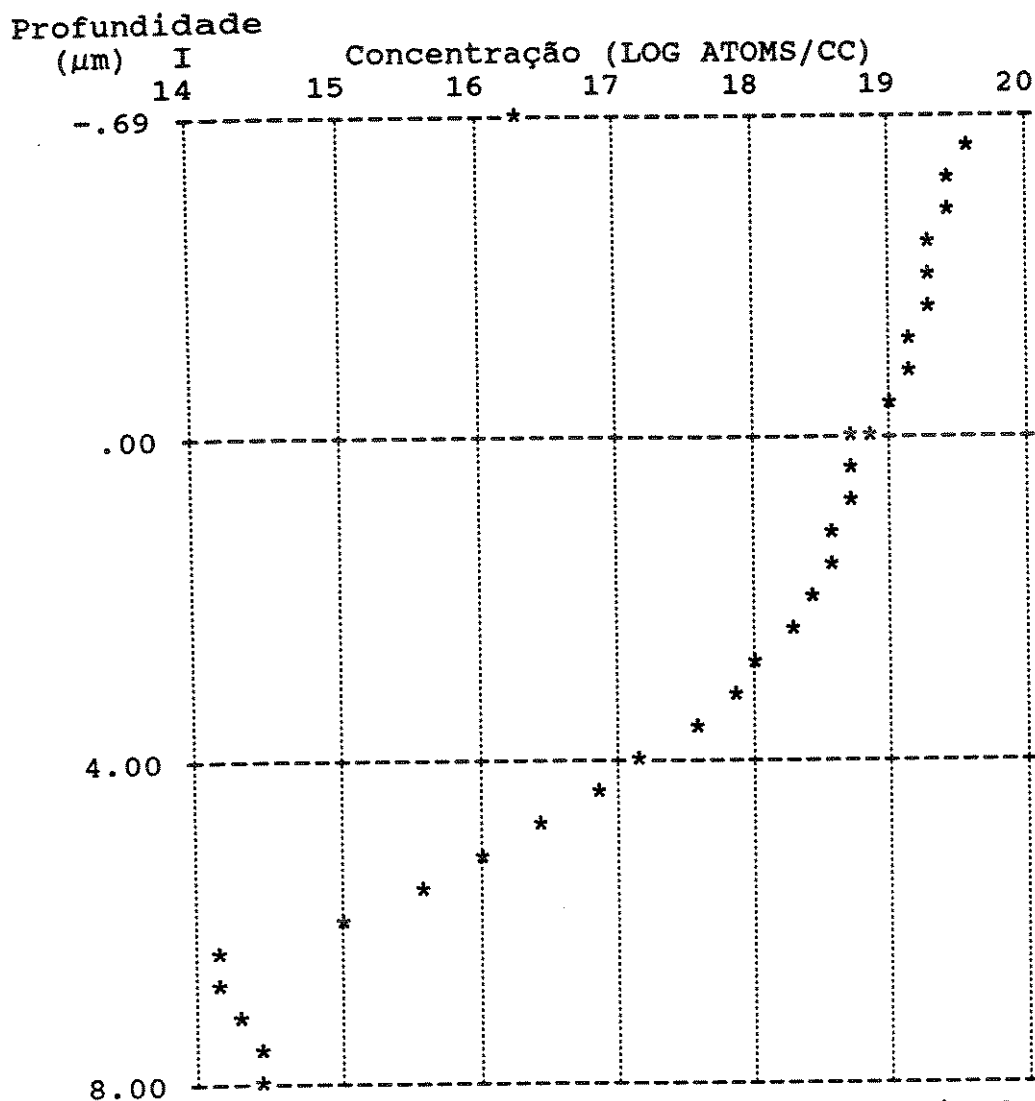


Figura II.10 - Gráfico Concentração×Profundidade equivalente à simulação SUPREM da tabela II.8

Simulação da Junção Lateral

- Oxidação inicial em 15 minutos e 750°C
- Pré-deposição de boro da junção lateral em T1 minutos e 950°C
- Penetração da junção lateral em T2 minutos e 1250°C
- Simulação do efeito da deposição da junção central em 90 minutos e 950°C
- Simulação do efeito da penetração da junção central em 390 minutos e 1150°C

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela II.9, com os valores de T1 e T2 simulados.

RESULTADOS OBTIDOS	T1/T2 63/85 tab. II.10 fig.II.11	90/90 tab. II.11 fig.II.12	115/65 tab. II.12 fig.II.13	135/60 tab. II.13 fig.II.14
espessura do óxido(μm)	0,9562	0,9562	0,9561	0,9561
profundidade da junção(μm)	5,06441	5,01905	5,01877	5,13101
carga de boro(x10 ¹² cm ⁻²)	0,5133575	1,023209	1,553150	2,003174

Tabela II.9 - Resultados das simulações da junção lateral

*** STANFORD UNIVERSITY PROCESS ENGINEERING MODELS PROGRAM ***
 *** VERSION 0-05 ***

- 1....TITLE JUNCAO LATERAL - CARGA=0.5E12CM-2
- 2....GRID DYSI=0.02, DPTH=0.04, YMAX=12
- 3....SUBS ORNT=100, ELEM=P, CONC=2.6E14
- 4....PRINT HEAD=Y
- 5....PLOT WIND=12, CMIN=14, NDEC=10, TOTL=Y
- 6....COMM DEPOSICAO LATERAL APOS UMA OXIDACAO
- 7....STEP TYPE=OXID, TEMP=750, TIME=15, MODL=DRYO
- 8....STEP TYPE=PDEP, ELEM=B, TEMP=950, TIME=63, CONC=1.2E20
- 9....COMM PENETRACAO LATERAL DE 5UM
- 10....STEP TYPE=ETCH
- 11....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=10, MODL=DRYO
- 12....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=25, MODL=STMO
- 13....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=50, MODL=NITO
- 14....COMM SIMULACAO DA DEPOSICAO CENTRAL
- 15....STEP TYPE=OXID TEMP=950, TIME=90, MODL=NITO
- 16....COMM PENETRACAO LATERAL DEVIDO A PENETRACAO CENTRAL
- 17....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=10, MODL=DRYO
- 18....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=50, MODL=STMO
- 19....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=330, MODL=NITO
- 20....END

STEP # 10 - JUNCAO LATERAL - CARGA=0.5E12CM-2- RESULTADO FINAL

NEUTRAL AMBIENT DRIVE-IN

TOTAL STEP TIME = 330.0 MINUTES
 INITIAL TEMPERATURE = 1150.00 DEGREES C.
 OXIDE THICKNESS = .9562 MICRONS
 SURFACE CONCENTRATION = 1.189617E+15 ATOMS/CM 3

	OXIDE DIFFUSION COEFFICIENT	SILICON DIFFUSION COEFFICIENT	SEGREGATION COEFFICIENT	SURFACE TRANSPORT COEFFICIENT
PHOSPHORUS	1.83736E-05	2.52478E-03	10.000	8.07106E-02
BORON	5.98174E-07	2.46200E-03	.87961	2.73927E-02

JUNCTION DEPTH		SHEET RESISTANCE	
5.06441	MICRONS	37022.1	OHMS/SQUARE
		36196.1	OHMS/SQUARE

CHEMICAL	CONCENTRATION	OF	BORON	
OXIDE CHARGE	= 3.303140E+11	IS	39.2	% OF TOTAL
SILICON CHARGE	= 5.133575E+11	IS	60.8	% OF TOTAL
TOTAL CHARGE	= 8.436715E+11	IS	99.7	% OF INITIAL
INITIAL CHARGE	= 8.462097E+11			

Tabela II.10 - Simulação da junção lateral para uma carga de 0.5E12CM-2

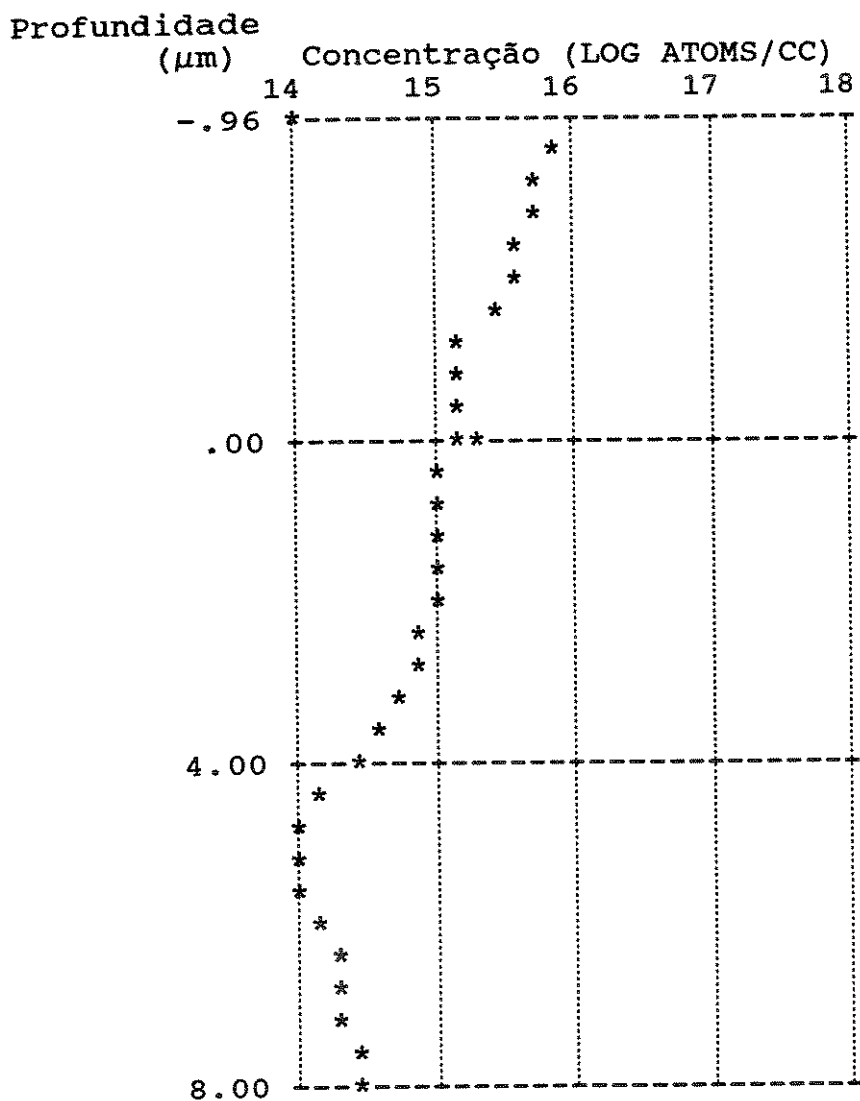


Figura II.11 - Gráfico Concentração×Profundidade equivalente à simulação SUPREM da tabela II.10

*** STANFORD UNIVERSITY PROCESS ENGINEERING MODELS PROGRAM ***
 *** VERSION 0-05 ***

1....TITLE JUNCAO LATERAL - CARGA=1.0E12CM-2
 2....GRID DYSI=0.02, DPTH=0.04, YMAX=12
 3....SUBS ORNT=100, ELEM=P, CONC=2.6E14
 4....PRINT HEAD=Y
 5....PLOT WIND=12, CMIN=14, NDEC=10, TOTL=Y
 6....COMM DEPOSICAO LATERAL APOS UMA OXIDACAO
 7....STEP TYPE=OXID, TEMP=750, TIME=15, MODL=DRYO
 8....STEP TYPE=PDEP, ELEM=B, TEMP=950, TIME=90, CONC=1.2E20
 9....COMM PENETRACAO LATERAL DE 5UM
 10....STEP TYPE=ETCH
 11....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=10, MODL=DRYO
 12....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=25, MODL=STMO
 13....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=55, MODL=NITO
 14....COMM SIMULACAO DA DEPOSICAO CENTRAL
 15....STEP TYPE=OXID, TEMP=950, TIME=90, MODL=NITO
 16....COMM PENETRACAO LATERAL DEVIDO A PENETRACAO CENTRAL
 17....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=10, MODL=DRYO
 18....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=50, MODL=STMO
 19....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=330, MODL=NITO
 20....END

STEP # 10 - JUNCAO LATERAL - CARGA=1.0E12CM-2 -RESULTADO FINAL
 NEUTRAL AMBIENT DRIVE-IN

TOTAL STEP TIME = 330.0 MINUTES
 INITIAL TEMPERATURE = 1150.00 DEGREES C.
 OXIDE THICKNESS = .9562 MICRONS
 SURFACE CONCENTRATION = 3.412782E+15 ATOMS/CM 3

	OXIDE DIFFUSION COEFFICIENT	SILICON DIFFUSION COEFFICIENT	SEGREGATION COEFFICIENT	SURFACE TRANSPORT COEFFICIENT
PHOSPHORUS	1.83736E-05	2.52478E-03	10.000	8.07106E-02
BORON	5.98174E-07	2.46200E-03	.87961	2.73927E-02

JUNCTION DEPTH	SHEET RESISTANCE
5.01905 MICRONS	14893.9 OHMS/SQUARE
	33572.6 OHMS/SQUARE

CHEMICAL CONCENTRATION OF BORON
 OXIDE CHARGE = 7.383816E+11 IS 41.9 % OF TOTAL
 SILICON CHARGE = 1.023209E+12 IS 58.1 % OF TOTAL
 TOTAL CHARGE = 1.761590E+12 IS 99.6 % OF INITIAL
 INITIAL CHARGE = 1.768362E+12

Tabela II.11 - Simulação da junção lateral para uma carga de 1.0E12CM-2

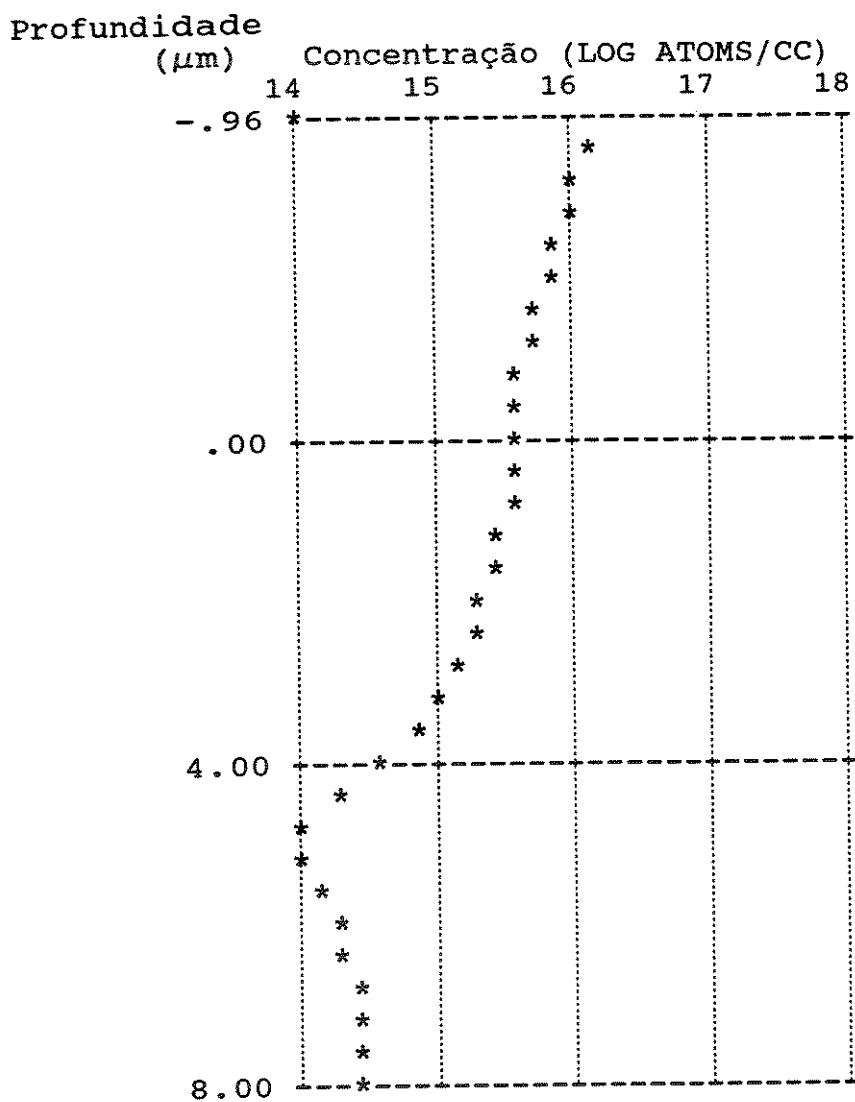


Figura II.12 - Gráfico Concentração×Profundidade equivalente à simulação SUPREM da tabela II.11

*** STANFORD UNIVERSITY PROCESS ENGINEERING MODELS PROGRAM ***
 *** VERSION 0-05 ***

1....TITLE JUNCAO LATERAL - CARGA=1.5E12CM-2
 2....GRID DYSI=0.02, DPTH=0.04, YMAX=12
 3....SUBS ORNT=100, ELEM=P, CONC=2.6E14
 4....PRINT HEAD=Y
 5....PLOT WIND=12, CMIN=14, NDEC=10, TOTL=Y
 6....COMM DEPOSICAO LATERAL APOS UMA OXIDACAO
 7....STEP TYPE=OXID, TEMP=750, TIME=15, MODL=DRYO
 8....STEP TYPE=PDEP, ELEM=B, TEMP=950, TIME=115, CONC=1.2E20
 9....COMM PENETRACAO LATERAL DE 5UM
 10....STEP TYPE=ETCH
 11....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=10, MODL=DRYO
 12....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=25, MODL=STMO
 13....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=30, MODL=NITO
 14....COMM SIMULACAO DA DEPOSICAO CENTRAL
 15....STEP TYPE=OXID, TEMP=950, TIME=90, MODL=NITO
 16....COMM PENETRACAO LATERAL DEVIDO A PENETRACAO CENTRAL
 17....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=10, MODL=DRYO
 18....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=50, MODL=STMO
 19....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=330, MODL=NITO
 20....END

STEP # 10 - JUNCAO LATERAL - CARGA=1.5E12CM-2 -RESULTADO FINAL
 NEUTRAL AMBIENT DRIVE-IN

TOTAL STEP TIME = 330.0 MINUTES
 INITIAL TEMPERATURE = 1150.00 DEGREES C.
 OXIDE THICKNESS = .9561 MICRONS
 SURFACE CONCENTRATION = 5.872471E+15 ATOMS/CM 3

	OXIDE DIFFUSION COEFFICIENT	SILICON DIFFUSION COEFFICIENT	SEGREGATION COEFFICIENT	SURFACE TRANSPORT COEFFICIENT
PHOSPHORUS	1.83736E-05	2.52478E-03	10.000	8.07106E-02
BORON	5.98174E-07	2.46200E-03	.87961	2.73927E-02

JUNCTION DEPTH	SHEET RESISTANCE
5.01877 MICRONS	9325.36 OHMS/SQUARE
	32867.1 OHMS/SQUARE

CHEMICAL CONCENTRATION OF BORON

OXIDE CHARGE = 1.186854E+12 IS 43.3 % OF TOTAL
 SILICON CHARGE = 1.553150E+12 IS 56.7 % OF TOTAL
 TOTAL CHARGE = 2.740005E+12 IS 99.6 % OF INITIAL
 INITIAL CHARGE = 2.751515E+12

Tabela II.12 - Simulação da junção lateral para uma carga de 1.5E12CM-2

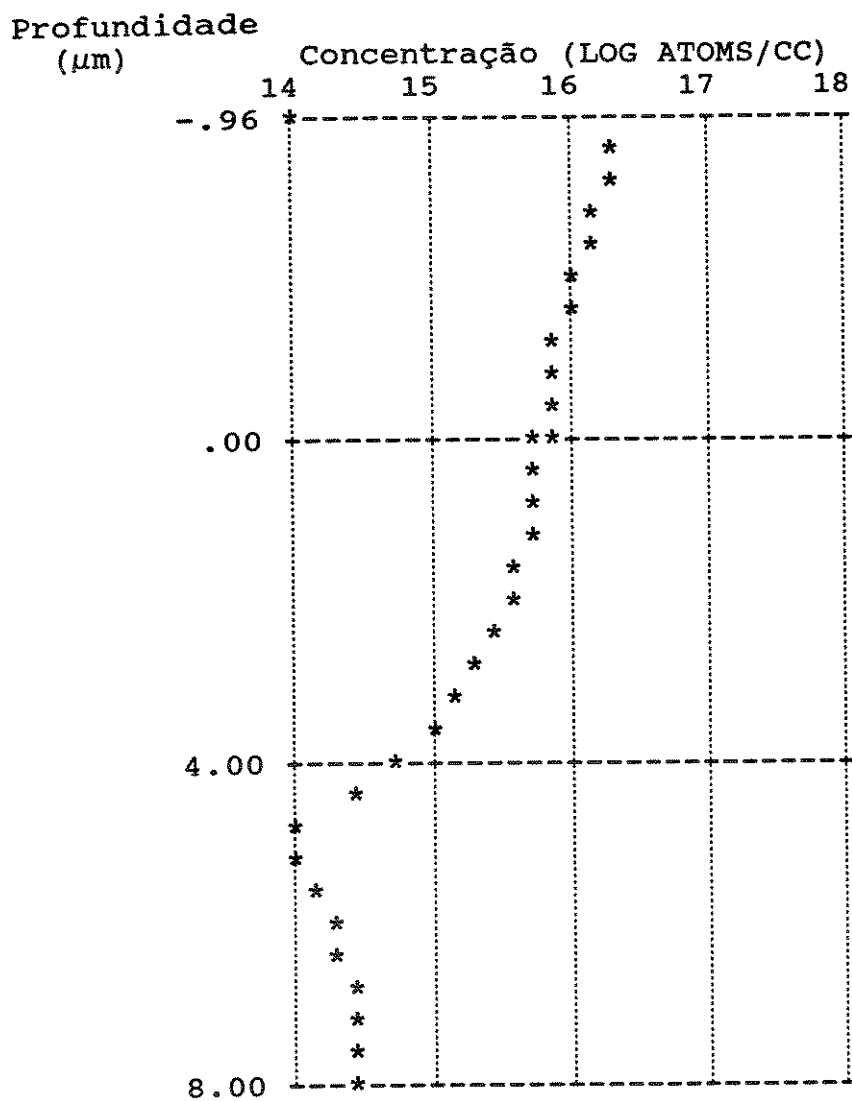


Figura II.13 - Gráfico Concentração×Profundidade equivalente à simulação SUPREM da tabela II.12

*** STANFORD UNIVERSITY PROCESS ENGINEERING MODELS PROGRAM ***
 *** VERSION 0-05 ***

1....TITLE JUNCAO LATERAL - CARGA=2.0E12CM-2
 2....GRID DYSI=0.02, DPTH=0.04, YMAX=12
 3....SUBS ORNT=100, ELEM=P, CONC=2.6E14
 4....PRINT HEAD=Y
 5....PLOT WIND=12, CMIN=14, NDEC=10, TOTL=Y
 6....COMM DEPOSICAO LATERAL APOS UMA OXIDACAO
 7....STEP TYPE=OXID, TEMP=750, TIME=15, MODL=DRYO
 8....STEP TYPE=PDEP, ELEM=B, TEMP=950, TIME=135, CONC=1.2E20
 9....COMM PENETRACAO LATERAL DE 5UM
 10....STEP TYPE=ETCH
 11....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=10, MODL=DRYO
 12....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=25, MODL=STMO
 13....STEP TYPE=OXID, TEMP=1250, TIME=25, MODL=NITO
 14....COMM SIMULACAO DA DEPOSICAO CENTRAL
 15....STEP TYPE=OXID, TEMP=950, TIME=90, MODL=NITO
 16....COMM PENETRACAO LATERAL DEVIDO A PENETRACAO CENTRAL
 17....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=10, MODL=DRYO
 18....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=50, MODL=STMO
 19....STEP TYPE=OXID, TEMP=1150, TIME=330, MODL=NITO
 20....END

STEP # 10 - JUNCAO LATERAL - CARGA=2.0E12CM-2 -RESULTADO FINAL

NEUTRAL AMBIENT DRIVE-IN

TOTAL STEP TIME = 330.0 MINUTES

INITIAL TEMPERATURE = 1150.00 DEGREES C.

OXIDE THICKNESS = .9561 MICRONS

SURFACE CONCENTRATION = 7.823952E+15 ATOMS/CM 3

	OXIDE DIFFUSION COEFFICIENT	SILICON DIFFUSION COEFFICIENT	SEGREGATION COEFFICIENT	SURFACE TRANSPORT COEFFICIENT
PHOSPHORUS	1.83736E-05	2.52478E-03	10.000	8.07106E-02
BORON	5.98174E-07	2.46200E-03	.87961	2.73927E-02

JUNCTION DEPTH

SHEET RESISTANCE

5.13101 MICRONS 7129.52 OHMS/SQUARE
 33329.8 OHMS/SQUARE

CHEMICAL CONCENTRATION OF BORON

OXIDE CHARGE = 1.553054E+12 IS 43.7 % OF TOTAL
 SILICON CHARGE = 2.003174E+12 IS 56.3 % OF TOTAL
 TOTAL CHARGE = 3.556228E+12 IS 99.6 % OF INITIAL
 INITIAL CHARGE = 3.571294E+12

Tabela II.13 - Simulação da junção lateral para uma carga de 2.0E12CM-2

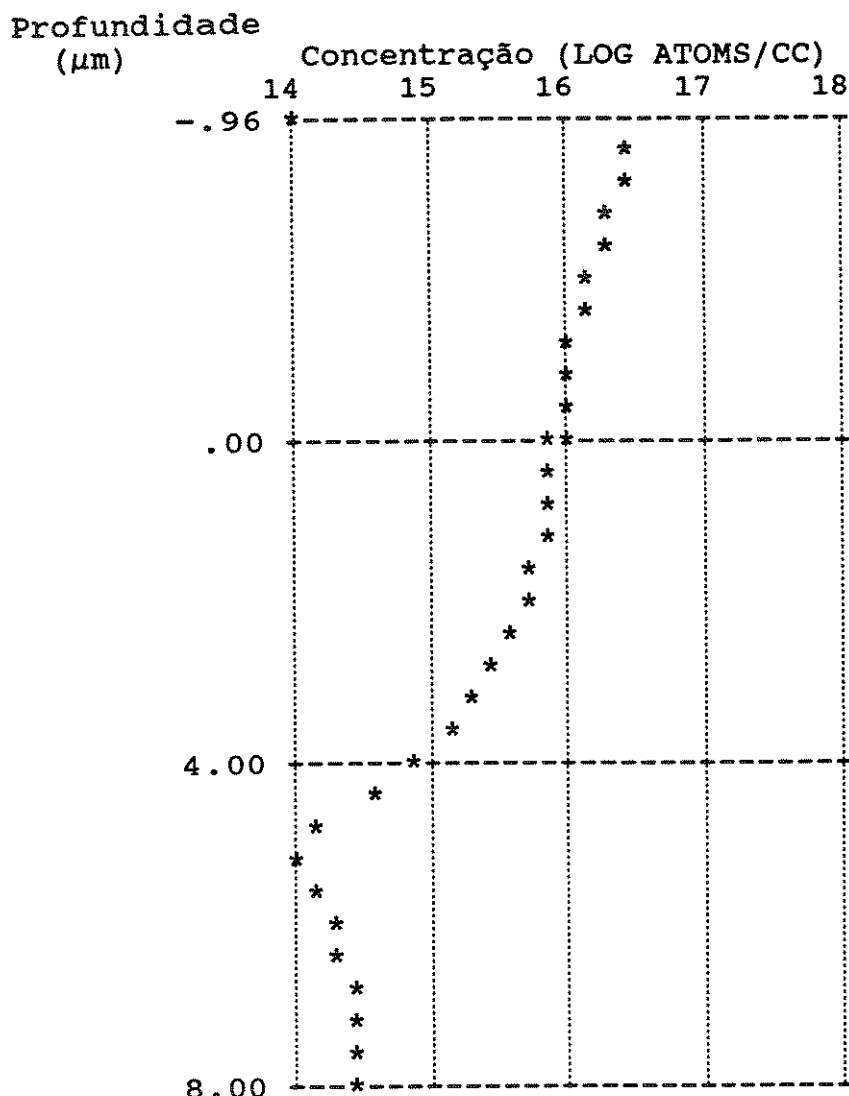


Figura II.14 - Gráfico Concentração×Profundidade equivalente à simulação SUPREM da tabela II.13

Aqui, pode-se ver que os resultados alcançados são excelentes, pois conseguiu-se os valores propostos, ou seja, a espessura do óxido menor do que $1\mu\text{m}$, a profundidade da junção lateral é aproximadamente $5\mu\text{m}$ e, as cargas de boro são, aproximadamente, $0,5$; $1,0$; $1,5$ e $2,0 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$.

Observações:

- 1) A concentração superficial máxima é de $1.2 \times 10^{20} \text{atm.cm}^{-3}$, de acordo com os resultados experimentais do processo utilizado [26].
- 2) Na descrição do arquivo de simulação SUPREM, o significado dos modelos são os seguintes [25]:
 DRY0 O₂ - seco
 STM0 H₂O - vapor
 NIT0 N₂ - nitrogênio

Capítulo III

Trabalhos de Laboratório

Neste capítulo será apresentada a sequência dos trabalhos realizados no laboratório.

III.1. Projeto das Máscaras

As máscaras foram confeccionadas em rubilite, devido ao seu menor custo.

O Laboratório de Eletrônica e Dispositivos - LED/UNICAMP dispunha das máscaras de um transistor bipolar, de um trabalho anterior, que atendia as necessidades, embora não possuísse a máscara de junção lateral. Portanto, resolveu-se utilizar estas máscaras, que possuem as seguintes dimensões:

Máscara de junção central : $\phi=50\text{mm}$ (figura III.1a)

Máscara de contatos : $\phi=9\text{mm}$ (figura III.1b)

Anel $\phi_{\text{INT}}=22,4\text{mm}$

$\phi_{\text{EXT}}=37,6\text{mm}$

Máscara de Metal : $\phi=20\text{mm}$ (figura III.1c)

Anel $\phi_{\text{INT}}=22\text{mm}$

$\phi_{\text{EXT}}=38\text{mm}$

Máscara de emissor : $\phi=20\text{mm}$ (figura III.1d)

A máscara da junção lateral foi feita com o diâmetro interno de 50mm e os externos de 50,1; 50,2; 50,4 e 50,6mm - Ver figura III.1e, que equivalem aos diferentes comprimentos da junção lateral. Para isto, fez-se uma única máscara com os cortes necessários, onde depois de fotoreduzida a máscara com comprimento da junção lateral de $300\mu\text{m}$, que equivale ao diâmetro mais externo, fez-se um "peeling" para se obter a máscara com comprimento da junção lateral de $200\mu\text{m}$, que foi então fotoreduzida e, assim, esta sequência foi repetida para os comprimentos da junção lateral de $100\mu\text{m}$ e $50\mu\text{m}$.

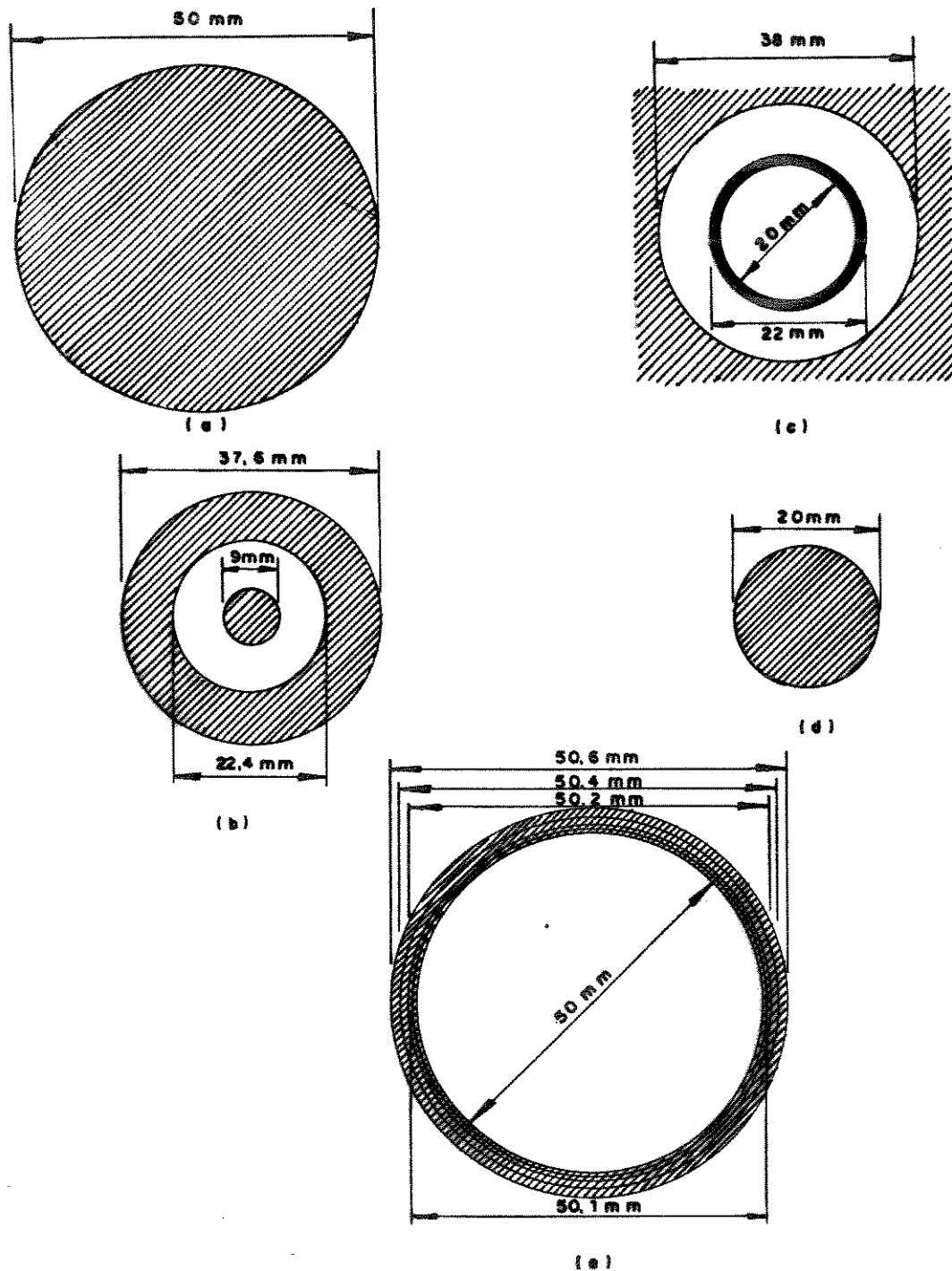


Figura III.1 - Máscaras do transistor a ser implementado (a) junção central (b) contato (c) metal (d) emissor (e) junção lateral

Na figura III.2 é mostrado uma seção transversal do transistor, que poderá ser implementado como uma aplicação.

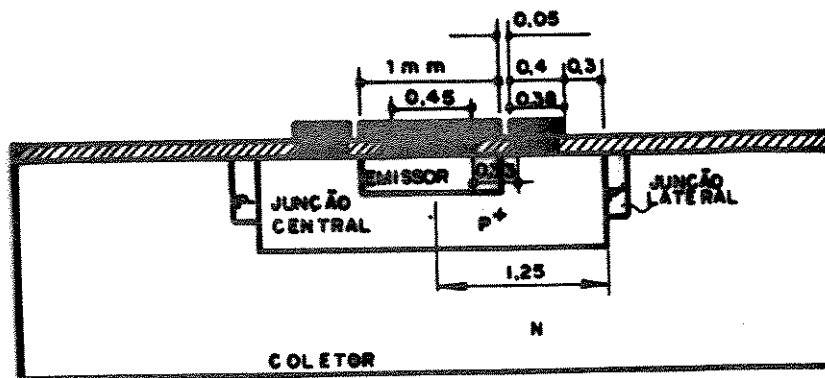


Figura III.2 - Transistor passível de implementação

A máscara possui 20 estruturas sobre um mesmo "wafer" distribuídas no formato de uma matriz 4x5, como mostrado na figura III.3.

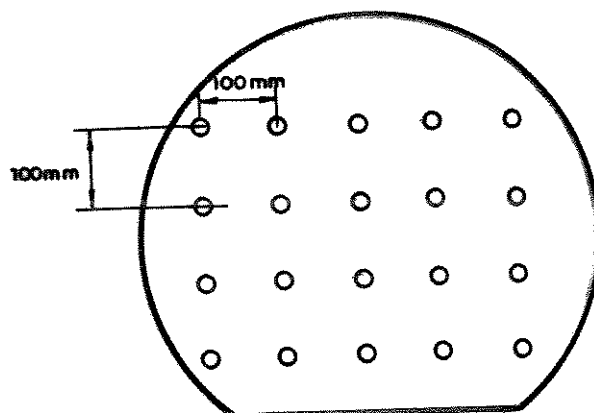


Figura III.3 - Disposição das estruturas sobre o "wafer"

Um problema encontrado com estas máscaras, é que elas não possuem marcas de alinhamento. Portanto, as máscaras de junção central e lateral foram feitas de tal modo que dois transistores em diagonais opostas diferem dos demais, para efeito de alinhamento. A máscara de junção central foi, então, refeita. Estas estruturas estão na figura III.4.

É importante lembrar que após a fotoredução, áreas cheias e vazias são invertidas.

Na figura III.5 tem-se uma visão em corte das placas de alta resolução, depois da fotoredução, para se ter idéia de como será feito o alinhamento. A máscara da junção central é considerada como referência. Através das estruturas das diagonais que estão diferentes, alinha-se a máscara da junção central e, em seguida a máscara de contato e, finalmente, a máscara de metal.

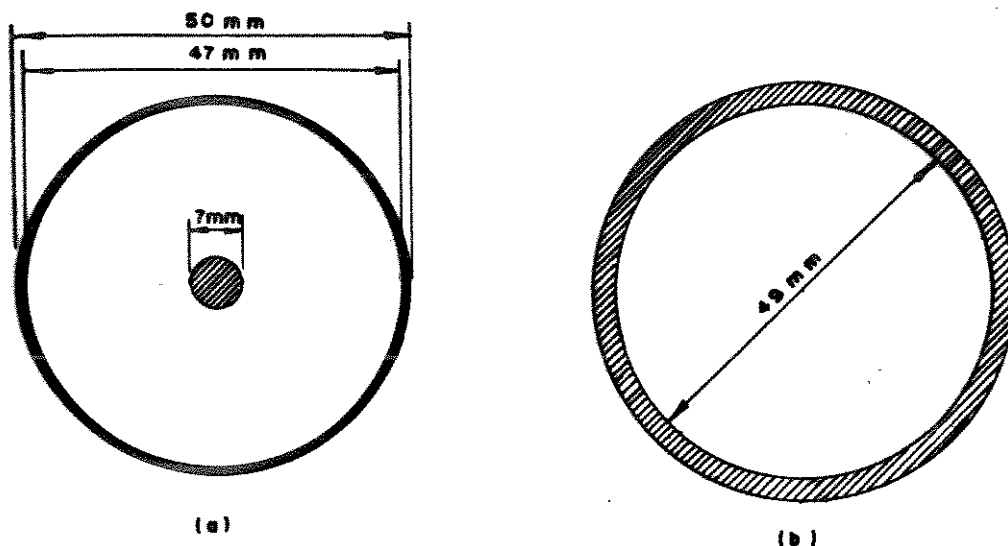


Figura III.4 - Estruturas das diagonais opostas das máscaras de (a) junção central e (b) junção lateral, para efeito de alinhamento

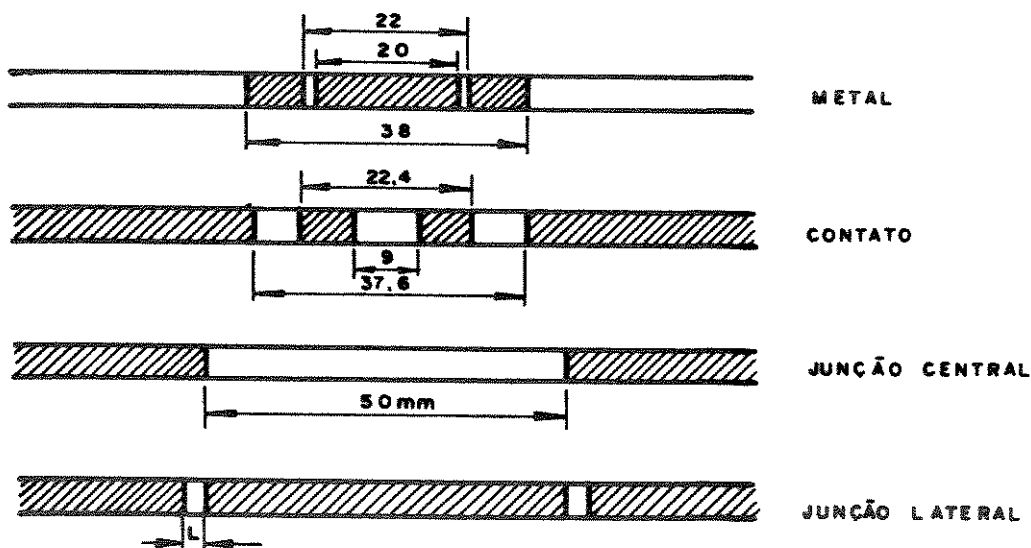


Figura III.5 - Visão em corte das máscaras fotoreduzidas para ilustração do alinhamento

III.2. Difusão das Estruturas

Com as máscaras prontas, partiu-se para a escolha das lâminas. As lâminas disponíveis no LED, mais adequadas para esta aplicação, são de 2", tipo N, da WACKER, com resistividade entre 14 e 19 ohms.cm.

A espessura da lâmina foi verificada com um aparelho TESR-SWISS, e permaneceu próximo de 300 microns.

Para a medição da resistividade da lâmina, utilizou-se um aparelho MILLIOHMMETER 503 - KEITHLEY INSTRUMENTS que verifica a medida V/I. Calculou-se a resistividade com o uso da fórmula [28]:

$$\rho = 4,53 \times V/I \times e. \quad (III.1)$$

onde : ρ é a resistividade [ohms.cm]
 V/I é a resistência [ohms]
 e é a espessura da lâmina [cm]

Como não se pode garantir uma boa uniformidade em toda a lâmina, foram feitas 5 medidas V/I ao longo de cada lâmina.

Os resultados das medidas estão apresentados na figura III.6.

Cálculo da resistividade ρ :

- 1- $\rho = 17,08 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 17,73 \text{ohms.cm}$
- 2- $\rho = 19,05 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 19,71 \text{ohms.cm}$
- 3- $\rho = 15,76 \text{ohms.cm}$; $\rho = 16,42 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 17,73 \text{ohms.cm}$
- 4- $\rho = 15,76 \text{ohms.cm}$; $\rho = 16,42 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 17,73 \text{ohms.cm}$
- 5- $\rho = 15,76 \text{ohms.cm}$; $\rho = 16,42 \text{ohms.cm}$; $\rho = 17,08 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 18,39 \text{ohms.cm}$
- 6- $\rho = 14,45 \text{ohms.cm}$; $\rho = 15,11 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 16,42 \text{ohms.cm}$
- 7- $\rho = 15,63 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 16,31 \text{ohms.cm}$
- 8- $\rho = 15,11 \text{ohms.cm}$; $\rho = 15,76 \text{ohms.cm}$; $\rho = 16,42 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 17,08 \text{ohms.cm}$
- 9- $\rho = 13,14 \text{ohms.cm}$; $\rho = 16,42 \text{ohms.cm}$; $\rho = 17,08 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 19,71 \text{ohms.cm}$
- 10- $\rho = 13,14 \text{ohms.cm}$; $\rho = 15,11 \text{ohms.cm}$; $\rho = 15,76 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 16,42 \text{ohms.cm}$
- 11- $\rho = 14,45 \text{ohms.cm}$; $\rho = 15,11 \text{ohms.cm}$; $\rho = 15,76 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 16,42 \text{ohms.cm}$
- 12- $\rho = 15,37 \text{ohms.cm}$; $\rho = 16,04 \text{ohms.cm}$ e $\rho = 16,70 \text{ohms.cm}$
- 13- $\rho = 16,70 \text{ohms.cm}$

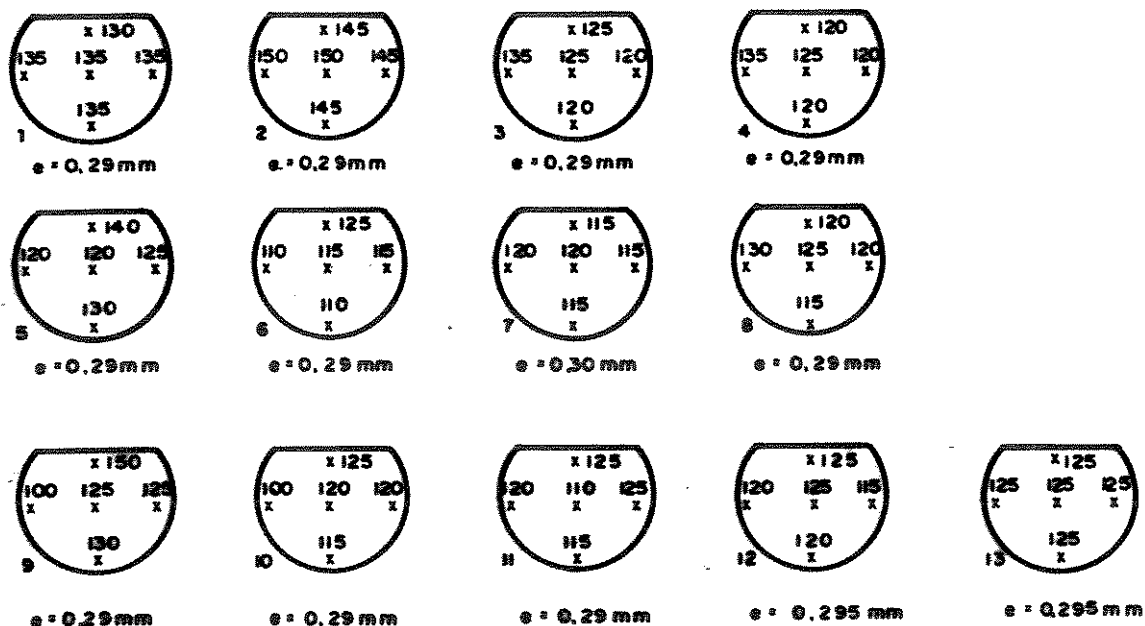


Figura III.6 - Resultados das medidas V/I ao longo das lâminas

Para a garantia da confiabilidade destes resultados, antes dos mesmos houve necessidade de se fazer uma limpeza da lâmina e retirada do óxido nativo. Esta limpeza é feita em solução de HF:H₂O DI 1:10, durante 10 segundos.

Finalmente, para deixar a lâmina pronta, foi feita uma oxidação inicial em forno de fósforo ou boro, da seguinte forma:

- a. Se fósforo: 1000°C, 10 minutos de O₂ (1lpm), 45 minutos H₂O+N₂, 5 minutos de N₂.
- b. Se boro: 1150°C, 10 minutos de O₂ (1lpm), 30 minutos H₂O+N₂, 5 minutos de N₂.

Devido à problemas na água utilizada no LED, perdeu-se três das lâminas selecionadas, restando, então dez lâminas para os testes.

Partiu-se então para a difusão das estruturas. Nesta etapa, não serão efetuados os passos de processo relativos ao emissor, pois só posteriormente poderá ser implementado o transistor, como uma aplicação do método proposto.

Inicialmente, adotou-se o comprimento da junção lateral de 300µm com as seguintes cargas laterais:

- 2 lâminas com carga de $0,5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
- 2 lâminas com carga de $1,0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
- 2 lâminas com carga de $1,5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
- 2 lâminas com carga de $2,0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

Em duas lâminas fez-se difusão somente da junção central, com o objetivo de obter um padrão para a comparação dos resultados finais.

A idéia é, dependendo destes resultados implementar L=200, 100 e 50µm, com a mesma variação de carga, como visto anteriormente.

Estas máscaras foram fotoreduzidas de 20 vezes e, em seguida, foi executado o seguinte processo:

- 1- Fotogravação em 2 lâminas da máscara junção central e, nas 8 lâminas restantes, da máscara da junção lateral (300µm).
- 2- Sequência de processo para as 2 lâminas fotogravadas com a máscara junção central:
 - 2.0- remoção do óxido
 - 2.1- pré-deposição de boro Temp=950°C e tempo=90min
 - 10min introdução barqueta
 - 80min N₂, 1lpm
 - 10min O₂, 1lpm
 - 10min retirada barqueta
 - 2.2- remoção do borossilicato
 - 2.3- penetração de boro Temp=1150°C e tempo=390min
 - 10min introdução barqueta
 - 10min O₂, 1lpm
 - 50min vapor d'água
 - 330min N₂, 1lpm
 - 10min retirada barqueta
- 3- Sequência de processo para as 8 lâminas fotogravadas com a máscara junção lateral
 - 3.0- remoção do óxido
 - 3.1- oxidação nas 8 lâminas Temp=750°C e tempo=15min
 - 10min introdução barqueta

15min O₂, 1lpm

10min retirada barqueta

3.2- pré-deposição em cima do óxido Temp=950°C

obs.: esta fase é dividida em quatro etapas, sendo cada etapa válida para duas lâminas

ETAPA I lâminas 1 e 2

tempo=63min

10min introdução barqueta

53min N₂, 1lpm

10min O₂, 1lpm

10min retirada barqueta

ETAPA II lâminas 3 e 4

tempo=90min

10min introdução barqueta

80min N₂, 1lpm

10min O₂, 1lpm

10min retirada barqueta

ETAPA III lâminas 5 e 6

tempo=115min

10min introdução barqueta

105min N₂, 1lpm

10min O₂, 1lpm

10min retirada barqueta

ETAPA IV lâminas 7 e 8

tempo=135min

10min introdução barqueta

125min N₂, 1lpm

10min O₂, 1lpm

10min retirada barqueta

3.3- remoção do borossilicato nas 8 lâminas

3.4- penetração de boro Temp=1250°C

obs.: esta fase também é dividida em quatro etapas, sendo cada etapa válida para 2 lâminas. As etapas I', II', III' e IV' são continuação das etapas I, II, III e IV, respectivamente.

ETAPA I' lâminas 1 e 2

tempo=185min

10min introdução barqueta

10min O₂, 1lpm

25min vapor d'água

50min N₂, 1lpm

10min retirada barqueta

ETAPA II' lâminas 3 e 4

tempo=90min

10min introdução barqueta

10min O₂, 1lpm

25min vapor d'água

55min N₂, 1lpm
 10min retirada barqueta

ETAPA III' lâminas 5 e 6
 tempo=65min
 10min introdução barqueta
 10min O₂, 1lpm
 25min vapor d'água
 30min N₂, 1lpm
 10min retirada barqueta

ETAPA IV' lâminas 7 e 8
 tempo=60min
 10min introdução barqueta
 10min O₂, 1lpm
 25min vapor d'água
 25min N₂, 1lpm
 10min retirada barqueta

3.5- fotografação nas 8 lâminas da máscara junção central

3.6- deposição de boro nas 8 lâminas Temp=950°C
 tempo=90min
 10min introdução barqueta
 80min N₂, 1lpm
 10min O₂, 1lpm
 10min retirada barqueta

3.7- remoção do borossilicato nas 8 lâminas

3.8- penetração de boro nas 8 lâminas Temp=1150°C, tempo=390min
 10min introdução barqueta
 10min O₂, 1lpm
 50min vapor d'água
 330min N₂, 1lpm
 10min retirada barqueta

4- Fotografação dos contatos nas 10 lâminas

Devido à problemas de operação do LED, o processo foi interrompido neste ponto. Porém, ainda faltam as etapas relativas à metalização, ou seja, evaporação, fotografação e recozimento do Alumínio nas dez lâminas. Sem esta etapa, não foi possível fazer a caracterização das lâminas, o que se espera que possa ocorrer assim que o Laboratório volte a operar.

Este fato, no entanto, não invalida, de forma nenhuma, os resultados obtidos, através de simulação, desta nova técnica de Extensão da Terminação da Junção. Pois, a simulação realizada através do simulador de processos SUPREM fornece um resultado muito próximo do real. Quando são realizados os trabalhos de laboratório, os valores de tempo e temperatura necessários para a difusão são os encontrados na simulação, apenas com pequenos ajustes.

Capítulo IV

Conclusão

Este processo pode ser uma boa alternativa para a produção de dispositivos de alta tensão planar com uma tecnologia simples, de baixo custo, sem a necessidade do uso de implantação de íons. Quando comparado com a técnica de implantação de íons este processo tem uma boa exatidão, de tal forma que as tensões de ruptura não são muito menores do que no caso da junção plana e, pode ser usado com equipamentos convencionais de difusão de baixo custo.

Uma vez que a carga de silício depositada na região da extensão da terminação da junção é fortemente dependente da espessura da barreira de óxido, é necessário efetuar uma oxidação bem controlada à baixa temperatura, para se conseguir tensões de ruptura próximas das obtidas com dispositivos de junção plana.

Os resultados encontrados através de simulações realizadas no simulador de processos SUPREM atenderam às especificações propostas por este trabalho.

E, o fato de não ter sido feita a caracterização, devido à problemas no LED/UNICAMP, não invalida os resultados obtidos, pois os resultados fornecidos pelo SUPREM são muito próximos do real, ou seja, quando são realizados os trabalhos de laboratório, os valores de tempo e temperatura necessários para a difusão são os encontrados na simulação, apenas com pequenos ajustes.

Capítulo V

Bibliografía

- [1] B. Jayant Baliga, "Modern Power Devices", A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1987.
- [2] Temple V.A.K., Tantraporn W., "Junction termination extension for near-ideal breakdown voltage in p-n junctions", IEEE Trans. Electron Devices, VOL ED 23, no 10, 1976.
- [3] Sanchez J.L., Liberos V., Leturcq Ph., "Terminaisons de jonctions haute tension pour composants de puissance integres", GCIS 89, Toulouse, France.
- [4] Sanchez J.L., Liberos V., Leturcq Ph., "Design and realization of high voltage junction terminations compatible with power integrated circuits technology", MIEL 89, Niš, Yugoslavia.
- [5] Kregar V., Milic-Štrkalj, "Optimization of the junction termination extension of high-voltage PN junctions", MIEL 89, Niš, Yugoslavia.
- [6] Temple V.A.K., Adler M.S., "A substrate etch geometry for near ideal breakdown voltage in p-n junction devices", IEEE Trans. Electron Devices, VOL ED 24, no 8, 1977.
- [7] B.J. Baliga, "High-voltage device termination techniques - A comparative review", IEE Proc., Vol. 129, Pt. I, no5, 1982.
- [8] R.L. Davies, F.E. Gentry, "Control of electric field at the surface of p-n junctions", IEEE Trans. Electron Devices, 1964.
- [9] B.J. Baliga and S.K. Ghandhi, "Analytical solutions for the breakdown voltage of abrupt cylindrical and spherical junctions", Solid State Electron., 19, 739-744 (1976).
- [10] S.M. Sze and G. Gibbons, "Effect of junction curvature on breakdown voltage in semiconductors", Solid State Electron., 9, 831-845 (1966).
- [11] V.A.K. Temple and M.S. Adler, "Calculation of the diffusion curvature related avalanche breakdown in high voltage planar p-n junctions", IEEE Trans. Electron Devices, ED-22, 910-916 (1975).
- [12] Y.C. Kao and E.D. Wolley, "High voltage planar p-n junctions", Proc. IEEE, 55, 1409-1414 (1967).
- [13] M.S. Adler, V.A.K. Temple, A.P. Ferro, and R.C. Rustay, "Theory and breakdown voltage for planar devices with a single field limiting ring", IEEE Trans. Electron Devices, ED-24, 107-113 (1977).
- [14] M. Bakowski, K.I. Lundström, "Depletion Layer Characteristics at the surface of beveled high-voltage p-n junctions", IEEE Trans. Electron Devices, VOL ED 20, no 6, 1973.
- [15] M.S. Adler and V.A.K. Temple, "Maximum surface and bulk electric fields at breakdown for planar and beveled devices", IEEE Trans. Electron Devices, ED-25, 1266-1270 (1978).
- [16] M. Bakowski, B. Hansson, "Influence of bevel angle and surface charge on the breakdown voltage of negatively beveled diffused p-n junctions", Solid-State Electronics, vol.18, pp. 651-657, 1975.

- [17] J. Cornu, "Field distribution near the surface of beveled p-n junctions at high-voltage devices", IEEE Trans. Electron Devices, ED-20, 347-352 (1973).
- [18] M.S. Adler and V.A.K. Temple, "A general method for predicting the avalanche breakdown voltage of negative bevelled devices", IEEE Trans. Electron Devices, ED-23, 956-960 (1976).
- [19] V.A.K. Temple, B.J. Baliga and M.S. Adler, "The planar junction etch for high voltage and low surface fields in planar devices", IEEE Trans. Electron Devices, ED-24, 1304-1310 (1977).
- [20] V.A.K. Temple and M.S. Adler, "The theory and application of a simple etch contour for near ideal breakdown voltage in plane and planar p-n junctions", IEEE Trans. Electron Devices, ED-23, 950-955 (1976).
- [21] V.A.K. Temple, "Practical aspects of the depletion etch method in high-voltage devices", IEEE Trans. Electron Devices, VOL ED 27, no 5, 1980.
- [22] F. Conti and M. Conti, "Surface breakdown in silicon planar diodes equipped with field plate", Solid State Electron., 15, 93-105 (1972).
- [23] V.A.K. Temple, "Junction termination extension, a new technique for increasing avalanche breakdown voltage and controlling surface electric fields in p-n junctions", IEEE International Electron Devices Meeting Digest, Abstract 20.4, pp. 423-426 (1977).
- [24] R. Stengl and U. Gosele, "Variation of lateral doping - a new concept to avoid high voltage breakdown of planar junctions", IEEE International Electron Devices Meeting Digest, Abstract 6.4, pp 154-157 (1985).
- [25] SUPREM - Présentation et mode d'emploi, Note Technique, par E. Caquot et S. Martin, fevrier 1982.
- [26] Boron +, Plus + - Owens Illinois - Solid Source Planar Dopants Catalog.
- [27] Tese de Mestrado em andamento no LED/UNICAMP, autor: José Francisco Nogueira, orientador: Prof. Wilmar Bueno de Moraes.
- [28] Douglas J. Hamilton, William G. Howard, "Basic Integrated Circuit Engineering", McGraw-Hill, 1975.

Apêndice A

MIEL 91 CONFERENCE - BELGRADE 15-18 May, 1991.

Movallem, Janete and Siqueira Dias, J.A.
LED - Laboratorio de Eletronica e Dispositivos
Faculdade de Engenharia Eletrica - UNICAMP
P.O. BOX 6061
13081 Campinas, SP - Brazil

AN ALL DIFFUSED JUNCTION TERMINATION EXTENSION PROCESS FOR HIGH VOLTAGE DEVICES

ABSTRACT

A simple technique that uses conventional boron pre-deposition with solid sources dopants was developed to make Junction Termination Extension (JTE) in substitution for the high cost ion-implanted processes. To obtain the extremely low doping levels for the fabrication of the JTE, a very thin oxide layer previously grown on the wafer by a LTO acts as a barrier to the boron charge, controlling the net charge that reaches the silicon surface.

1. INTRODUCTION

The Junction Termination Extension (JTE) [1] is one of the most promising techniques for the development of high voltage power devices compatible with standard Integrated Circuit technology. Although it has been proposed several years ago, only recently it has received more attention [2,3,4]. Among the advantages of the JTE technique are the small area and the low sensitivity to the substrate doping, when compared to the majority of planar high voltage devices fabricated today, that use field limiting rings or field plate techniques to

reduce the electrical peak field in the edge of the junctions, to maximize the breakdown voltage of the device.

However, to fabricate such junction terminations extensions, it is necessary to make a very light doping implanted P⁺ region, that surrounds the high voltage junctions. The implanted doses are in the range of 1.10^{12} at/cm², for a 40 ohm.cm substrate. This doping level is very difficult to obtain with conventional diffusion process step (with gas or solid-source dopants), even with a very low temperature pre-deposition.

2. DIFFUSION PROCESS

The technique we are studying is the pre-deposition of boron on the top of a well controlled oxide layer, using planar solid sources dopants. By controlling the thickness of this thermally grown oxide, we can control the amount of boron that will effectively reach the silicon surface, using conventional high temperature pre-deposition steps.

The control of the deposited charge is not as precise as in the case of ion implantation, but is still enough accurate to allow for this application. It is important to remember that even with ion-implanted techniques, the final accuracy of the charge left in the silicon is affected by the drive-in diffusion that is performed after the ion implantation, since there is segregation of the boron to the oxide over the P⁺ region.

Once state-of-the-art planar solid sources dopants can achieve a uniformity of about 1 percent across a wafer, the accuracy of the boron charge that will actually be deposited on the silicon surface is basically a function of the thickness of the oxide. In Figure 1 it is shown the relation between the breakdown voltage and the net boron charge of the P⁺ region

deposited on a N type substrate with a resistivity of 10^{14} ohm.cm [3].

The process conditions to obtain these boron charges are listed in Table I. As it can be seen, there is no critical process step, so that the high volume production of high voltage power devices using this technique for the junction termination extensions is expected to have a good yield.

The pre-deposition steps are made long enough to make the control of the boron charge deposited on the silicon basically a function of the oxide thickness, that is a parameter not very difficult to control.

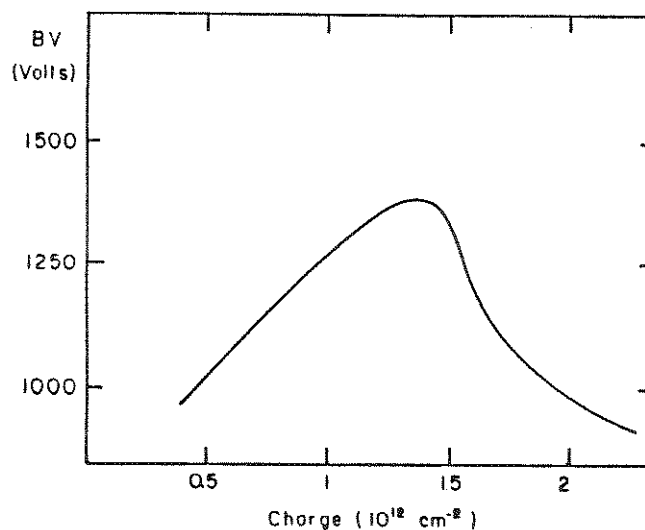


Figure 1. Breakdown voltage as a function of the boron charge deposited on the P junction termination extension region.

Boron charge Atoms/cm ²	LTO conditions	Pre-Dep. Temp. Degrees C	Pre-Dep. Time Minutes
0.5 10 ¹²	750 °C , 20 min.	950	63
1.0 10 ¹²	750 °C , 20 min.	950	90
1.5 10 ¹²	750 °C , 20 min	950	116
2.0 10 ¹²	750 °C , 20 min.	950	135

Table 1. Boron pre-deposition and LTO conditions for obtaining the net silicon charges shown in Figure 1.

3. CONCLUSIONS

This process can be a good alternative to the production of planar high voltage devices with a simple, low-cost technology, without the need of using ion-implantation. When compared with the ion-implanted technique this process has a good accuracy - so the breakdown voltages are not much lower than in the plane junction case - and can be used with conventional low cost diffusion equipment.

Since the silicon charge deposited in the junction termination extension region is strongly dependent on the thickness of the oxide barrier, it is necessary to perform a well controlled LTO to achieve breakdown voltages close to those obtained with plane junction devices.

REFERENCES

- [1] Temple, V.A.K., Tantraporn, W. , " Junction Termination Extension for Near-ideal Breakdown Voltage in P-N Junctions", IEEE Trans. Electron Devices, VOL. ED 23, no 8, 1976.
- [2] Sanchez, JL et al, "Terminaisons de Jonctions Haute Tension pour Composants de Puissance Intégrés", GCIS 89, Toulouse, France.
- [3] Sanchez, JL et al, "Design and Realization of High Voltage Junction Terminations Compatible with Power Integrated Circuits Technology", MIEL 89, Niš, Yugoslavia.
- [4] Kregar, V. et al, "Optimization of the Junction Termination Extension of High-Voltage P-N Junctions", MIEL 89, Niš, Yugoslavia.