

33 A  
29'



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

CONTRIBUCION AL DESARROLLO DE LA TECNOLOGIA DE  
RECTIFICADORES DE TIPO INDUSTRIAL.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO  
DE FISICO.



CINVESTAV

PRESENTA

FERNANDO PONCE HERNANDEZ.

CD. DE MEXICO.

1990.



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E ..... 1

I N T R O D U C C I O N ..... 4

C A P I T U L O I

F U N C I O N A M I E N T O D E L A S E S T R U C T U R A S P I N . ..... 5

1.- FUNCIONAMIENTO. ....	6
1-1) Polarización inversa de las uniones pn. ....	6
1-1-1) Tensión de ruptura. ....	6
1-1-2) Determinación del tipo de unión. ....	8
1-2) Polarización inversa de estructuras pin. ....	10
1-3) Polarización directa de uniones pn. ....	13
1-4) Polarización directa de estructuras pin. ....	15
2.- DISEÑO. ....	19
2-1) Diseño de rectificadores en polarización inversa. ...	19
2-1-1) Tensión de ruptura. ....	19
2-1-2) Contorno de los rectificadores. ....	23
2-2) Diseño de rectificadores en polarización directa. ...	26
3.- CONCLUSIONES. ....	41

C A P I T U L O I I

D E S C R I P C I O N D E L A T E C N O L O G I A D E R E C T I F I C A D O R E S 1 N 4 0 0 0 . . 4 3

1.- Material de partida. ....	43
-------------------------------	----

	pág.
2.- Difusión de tipo n. ....	44
3.- Eliminación de la difusión de tipo n de una las caras. .	46
4.- Difusión de tipo p. ....	47
5.- Metalización. ....	48
5-1) Niquelado. ....	49
5-2) Fotolitografía por las dos caras de la oblea. ....	50
5-3) Estañado. ....	51
6.- Separación química de dispositivos. ....	55
7.- Pasivación. ....	55

## C A P I T U L O            I I I

### SELECCION DE UN MATERIAL PARA SOSTENER A LOS DISPOSITIVOS .. 60

1.- Características del soporte. ....	50
2.- Estudio de diversos materiales. ....	61
2-1) Resina KMER. ....	62
2-2) Chapopote. ....	63
2-3) Ceras y gomas. ....	64
2-3-1) Cera de abeja. ....	64
2-3-2) Cera de campeche. ....	64
2-3-3) Cera de candelilla. ....	65
2-3-4) Cera de carnauba. ....	65
2-3-5) Mezclas de cera-goma. ....	66
2-3-6) Gomas. ....	66
2-3-7) Mezcla de cera de carnauba-goma damar. ....	67
3.- Conclusiones. ....	69

## C A P I T U L O I V

SEPARACION QUIMICA DE RECTIFICADORES 1N4000 .....	70
1.- Introducción. ....	70
2.- Diferentes formas de separar dispositivos. ....	71
3.- Ataque químico del Silicio. ....	73
4.- Descripción del montaje del ataque químico. ....	74
5.- Separación química de dispositivos por las dos caras: Dispositivos a granel. ....	75
6.- Separación química de dispositivos por una cara: Dispositivos fijos. ....	82
6-1) De orientación (111). ....	83
6-2) De orientación (100). ....	93
6-3) Muestras grandes. ....	94
7.- Conclusiones. ....	97

## C A P I T U L O V

RESULTADOS: TECNOLOGIA DISPONIBLE Y MEDICIONES ELECTRICAS .	100
1.- Descripción de la tecnología disponible. ....	100
2.- Resultados diversos: mediciones eléctricas. ....	108
2-1) Polarización inversa. ....	109
2-2) Polarización directa. ....	116
3.- Conclusiones. ....	117
CONCLUSIONES .....	118
BIBLIOGRAFIA .....	119

## I N T R O D U C C I O N

Este trabajo es una contribución importante al desarrollo de la tecnología de rectificadores 1N4000 de tipo industrial, actividad en la cual trabaja el Grupo de Dispositivos de Potencia de la Sección de Electrónica de Estado Sólido del Departamento de Ingeniería Eléctrica del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del I.P.N.

En este trabajo se hizo un estudio amplio de la separación química de dispositivos, mostrando que es posible realizar esta separación con una buena calidad. También se encontró un material adecuado para mantener fijos a los dispositivos transitoriamente, de la separación química a la fijación ( y pasivación ) de los mismos con hule de silicio.

Es conveniente aclarar que la tecnología desarrollada es de tipo industrial, la cual es bastante más compleja que la fabricación de dispositivos a nivel de laboratorio.

En algunas etapas, como la difusión no se participó en su desarrollo, sin embargo se estudió la tecnología completa. Se presenta un capítulo del funcionamiento de estructuras pin. En el segundo capítulo se describe la tecnología someramente y en el tercer capítulo, se describe cómo se seleccionó un material de fijación de los dispositivos. En el cuarto capítulo se reporta el estudio de la separación química definiendo un método de caracterización cuantitativa y una caracterización cualitativa. En el quinto y último capítulo se muestran resultados de la tecnología disponible al final de este estudio así como de mediciones eléctricas de dispositivos terminados.

## C A P I T U L O     I

### FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE RECTIFICADORES: ESTRUCTURAS PIN

El diseño de rectificadores ó diodos pin, es el aspecto clave en la fabricación de estos dispositivos. Tal diseño permitirá precisar las características de la estructura PIN en cuanto a dopajes, profundidad de las difusiones y adquirir experiencia en las precauciones que deben tomarse en los diversos procesos que intervienen en la fabricación de estos dispositivos.

La parte de funcionamiento se incluye para hacer más comprensible el aspecto de diseño. Este punto está cubierto en la literatura por lo cual, se resumirán los resultados [ 1, 2, 3 y 4 ].

Los aspectos de diseño presentados en este capítulo, son importantes porque permiten optimizar y facilitar la fabricación de estos dispositivos. Gran parte de los desarrollos e interpretaciones en cuanto a diseño no se encuentran disponibles en la literatura especializada.

Aún un diodo discreto de baja potencia consiste de una región central poco dopada muchas veces aproximada como intrínseca y de dos regiones laterales fuertemente dopadas. Estos dispositivos son conocidos como estructuras ó diodos PIN.

## 1.- FUNCIONAMIENTO.

1-1) Polarización inversa de uniones pn.

1-1-1) Tensiones de ruptura.

La figura (1) muestra las dos uniones pn más usuales. La unión pn abrupta y fuertemente asimétrica supone una de las regiones mucho más contaminada que la otra así como la región poco dopada lo está uniformemente.

La tensión de ruptura está dada por la ecuación siguiente:

$$V_{rupa} = 5.34 \times 10^{13} N_D^{-3/4} \quad (\text{Volts}) \quad (1)$$

donde:

$N_D$  ( $\text{cm}^{-3}$ ): dopaje de la región poco contaminada.

El ancho de la región de deserción a la tensión de ruptura está dada por:

$$W_{Da} = 2.57 \times 10^{-2} V_{rupa}^{2/3} \quad (\mu\text{m}) \quad (2)$$

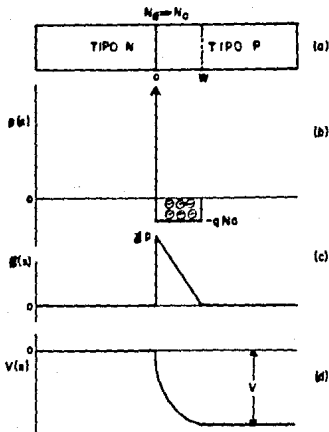
ó por:

$$W_{Da} = 2.663 \times 10^{14} N_D^{-7/8} \quad (\mu\text{m}) \quad (3)$$

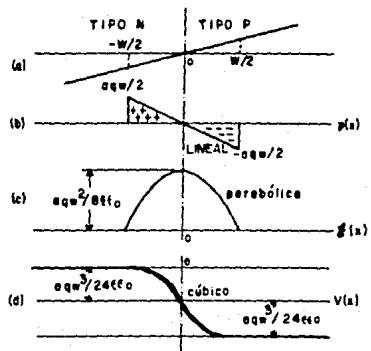
De las ecuaciones (1) y (3) puede obtenerse la expresión para el campo eléctrico máximo a la tensión de ruptura:

$$E_{ca} = 4010.5 N_D^{1/8} \quad (\text{V/cm}) \quad (4)$$





union abrupta polarizada  
inversamente.



union lineal polarizada  
inversamente.

Fig. 1.- Diagramas principales de uniones pn abruptas y graduales.

Las expresiones equivalentes para la unión gradual ó lineal son las siguientes:

$$V_{rupl} = 9.17 \times 10^9 a^{-4} \quad (\text{volts})$$

donde:

$a(\text{cm}^{-4})$ : gradiente de concentración.

El ancho de la región de deserción a la tensión de ruptura está dada por la ecuación:

$$W_{dl} = 2.15 \times 10^{-2} V^{7/6} \quad (\mu\text{m}) \quad (5)$$

ó por:

$$W_{D1} = 2.228 \times 10^{-2} N_D^{-7/8} \quad (\mu\text{m}) \quad (6)$$

Estas dos ecuaciones son parecidas a las ecuaciones (2) y (3). De hecho, podría usarse un valor medio de estas ecuaciones y aplicarse a los dos tipos de uniones indistintamente.

### 1-1-2) Determinación del tipo de unión.

Cuando se realiza una difusión superficial ó poco profunda y con una concentración superficial alta en un sustrato poco y uniformemente contaminado, la tensión de ruptura de esta unión pn así fabricada está dada por la ecuación (1) y depende únicamente de la concentración del sustrato. A medida que las difusiones se hagan más profundas y/o la concentración superficial disminuya, la tensión de ruptura irá aumentando y en el límite se comportará como una unión gradual.

Una manera sencilla y precisa de saber si una unión pn difundida se puede tratar como una unión abrupta es determinando el valor mínimo del gradiente de concentración al cual la unión pn se sigue comportando como abrupta. En el caso de que se cumpla la desigualdad siguiente:

$$1.1 V_{rupl} \geq V_{rupa}$$

la unión pn difundida ya no se podría tratar como una unión abrupta. Sustituyendo se obtiene:

$$a_{lim} \leq 4.9 \times 10^{-10} N_D^{1.875} \quad (\text{cm}^{-4}) \quad (7)$$

Una distribución típica de impurezas difundidas se puede describir por la ecuación siguiente:

$$C(x) = C_s \exp(-Ax^2) - C_b$$

donde:

$C_s$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) : concentración superficial.

$C_b$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) : concentración en el sustrato.

A : cte. del proceso.

La pendiente de esta distribución en la profundidad de unión puede expresarse de la manera siguiente:

$$a_{\text{dif}} = \frac{-2 \ln(C_s/C_b)}{x_j} C_b \quad (8)$$

En la tabla (1) se incluyen valores para las concentraciones superficiales de las difusiones  $C_s$ , así como concentraciones del sustrato  $C_b$  los cuales son usuales para dispositivos de potencia. La concentración del sustrato se aumenta para entender mejor la utilidad de estos cálculos. Concentraciones del sustrato inferiores a  $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  implican que pueden ser tratadas como difusiones abruptas. Para aplicaciones en dispositivos de potencia lo usual son concentraciones  $C_b$  inferiores a  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  por lo cual el manejarlas como abruptas dará precisión y "facilidad" en el análisis y el diseño de estos dispositivos.

$C_s$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$x_j$ (cm)	$C_s$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$a_{\text{dif}}$ ( $\text{cm}^{-4}$ )	$a_{\text{ifm}}$ ( $\text{cm}^{-4}$ )	tipo de unión
$10^{13}$	$50 \times 10^{-4}$	$10^{10}$	$5.5 \times 10^{16}$	$1.2 \times 10^{15}$	abrupta
$10^{14}$	$50 \times 10^{-4}$	$10^{10}$	$4.6 \times 10^{17}$	$8.7 \times 10^{16}$	abrupta
$10^{15}$	$50 \times 10^{-4}$	$10^{10}$	$3.7 \times 10^{18}$	$6.5 \times 10^{18}$	"lineal"
$10^{13}$	$50 \times 10^{-4}$	$10^{18}$	$4.6 \times 10^{16}$	$1.2 \times 10^{15}$	abrupta
$10^{14}$	$50 \times 10^{-4}$	$10^{18}$	$3.7 \times 10^{17}$	$8.7 \times 10^{16}$	abrupta
$4 \times 10^{14}$	$50 \times 10^{-4}$	$10^{18}$	$1.25 \times 10^{18}$	$1.17 \times 10^{18}$	abrupta
$5 \times 10^{14}$	$50 \times 10^{-4}$	$10^{18}$	$1.52 \times 10^{18}$	$1.78 \times 10^{18}$	"lineal"

Tabla 1.- Determinación del tipo de unión.

#### 1-2) Polarización inversa de estructuras PIN.

La figura (2) presenta la distribución del campo eléctrico en una estructura PIN. Esta estructura consiste de una región central poco dopada de tipo n ó tipo p la cual frecuentemente es aproximada como una región intrínseca y de dos regiones laterales profundas y muy contaminadas. Los rectificadores presentan una estructura de este tipo.

Para que tenga sentido una estructura PIN, el ancho de la región central poco dopada debe limitar la extensión del campo eléctrico. Lo anterior puede manejarse de la manera siguiente:

a) Normalmente se desea un dispositivo que presente una tensión de ruptura igual ó mayor a un cierto valor dado:

$$V_{\text{rup}}(\text{pin})$$

b) Con este valor de tensión, se puede calcular la contaminación máxima, usando la ecuación (1) donde se supone que:

$$V_{rupa} = V_{rup} (pin)$$

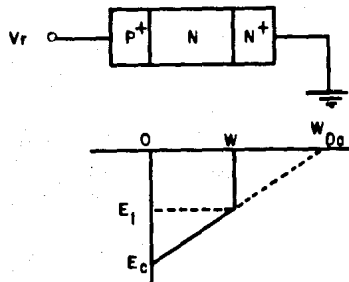


Fig. 2.- Distribución del campo eléctrico de una estructura PIN.

en este límite, el ancho de la región central poco dopada sería igual al ancho de la región de deserción que ocuparía esta unión en el caso de que la región poco dopada fuera muy ancha. Para tener una distribución del campo eléctrico similar a la de la figura (2), se necesitaría disminuir el dopaje.

La tensión de ruptura ( ver fig. 2 ) de la unión pn está dada por la ecuación :

$$V_{rup} (pn) = \frac{\epsilon N_c D_a}{2} \quad (9)$$

La tensión de ruptura de la estructura pin ( ver fig. 2 ) está dada por la ecuación:

$$V_{rup}(\text{pin}) = \frac{\xi_c W_{Da}}{2} - \frac{\xi_1 (W_{Da} - W)}{2}$$

eliminando  $\xi_1$  de la ecuación, se obtiene:

$$V_{rup}(\text{pin}) = \frac{W_{Da} \xi_c}{2} (2\eta - \eta^2) \quad (10)$$

donde:

$$\eta = \frac{W}{W_{Da}}$$

en realidad, esta ecuación es de muy poca utilidad ya que usualmente el valor de  $V_{rup}(\text{pin})$  se fija como una especificación eléctrica del dispositivo y es el ancho de la región central poco dopada la que se ajusta en función del dopaje de esta misma región. La expresión útil es la siguiente:

$$\frac{W}{W_{Da}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2 V_{rup}(\text{pin})}{W_{Da} \xi_c}} \quad (11)$$

en la figura (3) se presentan tres curvas para tres estructuras

pin definidas cada una por su tensión de ruptura. En la parte de diseño entre otros aspectos, se analizará con cuidado este tipo de curvas.

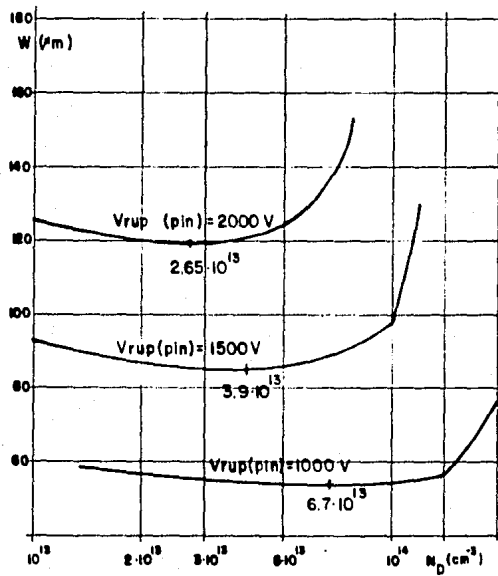


Fig. 3.- Ancho de la región central en función del dopaje de esta misma región.

### 1-3) Polarización directa de uniones pn.

La inyección de portadores en un diodo polarizado directamente puede ser dividida en muy bajo nivel, bajo nivel y alto nivel.

i) Muy bajo nivel.

En este caso se supone que la recombinación ocurre principalmente en la región de deserción a través de niveles profundos de impurezas. La corriente está dada por:

$$J_{F_{\dots}} = - \frac{q n_i W_D}{2\tau} \left( e^{\frac{qV_F}{2kT}} - 1 \right) \quad (12)$$

donde:

$n_i$  = Densidad intrínseca de portadores.

$W_D$  = Ancho de la región de deserción.

$\tau$  = Tiempo de vida de los portadores en la región de deserción.

$V_F$  = Tensión directa aplicada.

ii) Bajo nivel.

Ahora la recombinación ocurre principalmente en las regiones neutras a un lado de la región de deserción. En el caso de una unión  $n^+p$  la corriente está dada por:

$$J_{F_{\dots}} = J_n = - \frac{q D_n \bar{n}_p}{L_n} \left[ \exp \left( \frac{qV_F}{kT} \right) - 1 \right] \quad (13)$$

donde:

$D_n$  = Coeficiente de difusión de electrones.

$\bar{n}_p$  = Densidad promedio de portadores inyectados.

$L_n$  = Longitud de difusión de portadores inyectados.



iii) Alto nivel de inyección.

En este caso se tiene una alteración importante en las concentraciones de portadores mayoritarios lo cual origina un campo eléctrico. El movimiento de los portadores es por difusión y por campo eléctrico. En este caso sólo una parte de la tensión aparece en la unión. La ecuación es la siguiente:

$$J_{F \text{ alto nivel}} = J_n \approx - \frac{2qD_n n_i}{L_n} \exp \left( \frac{qV_F}{2kT} \right) \quad (14)$$

en estas condiciones de alto nivel, el grado de dopaje de la región poco dopada carece de significado.

1-4) Polarización directa de estructura pin.

El diodo pin es especialmente importante porque es la estructura más eficiente para soportar altos voltajes en polarización inversa.

La ecuación de transporte en estado estacionario en materiales muy resistivos es la siguiente:

$$0 = -\frac{n}{\tau_a} + D_a \frac{d^2 n}{dx^2} \quad (15)$$

la cual puede ser escrita como:

$$\frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{n}{L_a^2} = 0 \quad (16)$$

donde:

$D_a, L_a$ : Parámetros ambipolares.

$\tau_a$ : Tiempo de vida de alto nivel de inyección.

Suponiendo que la estructura pin pueda ser tratada como abrupta y el ancho de la región central poco dopada sea de  $2d$ , las densidades de corriente están dadas por :

$$J_{n,+d} = 2q D_n \left. \frac{dn}{dx} \right|_{x = +d} \quad (17)$$

$$J_{p,-d} = -2q D_p \left. \frac{dn}{dx} \right|_{x = -d} \quad (18)$$

la concentración de electrones está dada por:

$$n = \frac{\tau_a J}{2qL_a} \left[ \frac{\cosh(x/L_a)}{\sinh(d/L_a)} - B \frac{\sinh(x/L_a)}{\cosh(d/L_a)} \right] \quad (19)$$

donde:

$$B = \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}$$

para el caso del silicio,  $b = \mu_n/\mu_p = 3$  tal que  $B = 0.5$ . En el caso de que las movilidades pudieran considerarse iguales, entonces  $B = 0$ . La figura (4) muestra estas distribuciones de portadores para estos dos casos. Ahora se puede determinar la caída de voltaje en la región poco dopada.

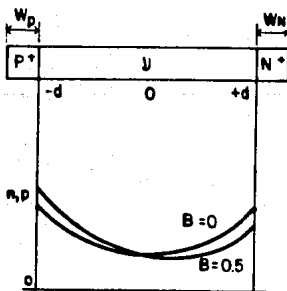


Fig. 4.- Distribución de portadores para una estructura pin.

Las ecuaciones para las densidades de corriente son las siguientes:

$$J_p = q \mu_p \left[ n \mathcal{E} - \frac{k T}{q} \frac{dn}{dx} \right] \quad (20)$$

$$J_n = q \mu_n \left[ n \mathcal{E} + \frac{k T}{q} \frac{dn}{dx} \right] \quad (21)$$

$$J = J_p + J_n \quad (22)$$

combinando estas ecuaciones se obtiene:

$$\mathcal{E} = \frac{J}{qn(\mu_n + \mu_p)} - \frac{k T}{q} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} \quad (23)$$

la expresión para el voltaje es obtenida integrando esta ecuación. Algunas soluciones sencillas son obtenidas para algunos casos especiales, por ejemplo:

a)  $d \leq L_a$

$$V_m \cong \frac{3kT}{2q} \left[ \frac{d}{L_a} \right]^2 \quad (24)$$

$$b) d \geq 3L_a$$

$$V_m \cong \frac{3 \pi k T}{8 q} \exp \left[ \frac{d}{L_a} \right] \quad (25)$$

## 2.- D I S E Ñ O.

### 2-1) Diseño de rectificadores en polarización inversa.

#### 2-1-1) Tensión de ruptura.

De acuerdo a la parte (1-1), las uniones pn usuales en dispositivos de potencia se comportan siempre como uniones abruptas. Lo anterior se debe en gran medida al hecho de requerirse para estas aplicaciones, de sustratos de alta resistividad.

Por lo anterior, este estudio se basará en las ecuaciones presentadas en los incisos (1-1) y (1-2).

La figura (3) presenta tres curvas cada una para una determinada tensión de ruptura. Es claro que la parte derecha de las curvas es una región que debe excluirse debido a que implica que la región central poco dopada sea muy ancha y a que variaciones pequeñas en el dopaje introduce variaciones importantes en la tensión de ruptura de las estructuras pin. Las variaciones del ancho de la región angosta también se manifiestan de manera importante en la tensión de ruptura.

La región menos crítica a variaciones en el dopaje y en el ancho de la región angosta es la región vecina al mínimo que presentan las curvas presentadas en la figura (3) por lo cual es importante analizar con mucho cuidado esta región. De hecho, la tensión de ruptura es prácticamente insensible a variaciones en el dopaje de esta región central.

Por lo expresado anteriormente, sería conveniente conocer la expresión que permita calcular este mínimo. El primer paso sería escribir la ecuación (11) en función del dopamiento obteniéndose la expresión siguiente:

$$\frac{W}{B} = N_D^{-7/8} - \sqrt{N_D^{-7/4} - \frac{V_{rup}(\text{pin}) N_D^{-1}}{A}} \quad (26)$$

en donde A y B son dos constantes.

Derivando esta expresión e igualando a cero y resolviendo para  $N_D$  se tiene:

$$N_{D,op} = 6.6787 \times 10^{17} V_{rup}(\text{pin})^{-4/3} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad (27)$$

con este dopaje " óptimo " se obtiene la región central más angosta para una cierta estructura pin con una tensión de ruptura dada.

Otros parámetros importantes para este caso " óptimo " pueden calcularse con las ecuaciones siguientes:

$$V_{rupop} (pn) = 2.2857 V_{rup} (pin) \quad (28)$$

sustituyendo la ecuación (28) en la ecuación (2), se obtiene:

$$W_{Dop} = 6.742 \times 10^{-2} V_{rup} (pin)^{7/6} \quad (29)$$

este es el ancho que la región de deserción alcanzaría para el dopaje " óptimo " suponiendo que la región poco dopada fuera muy ancha ( caso de una unión pn ). En este caso óptimo:

$$\eta = \frac{W_{op}}{W_{Dop}} = 1/4 \quad (30)$$

donde:

$\eta$  = relación de anchos de la región central al de la región de deserción en el caso óptimo.

De acuerdo a la ecuación anterior, el ancho de la región central poco dopada está dada por:

$$W_{op} = 1.6855 \times 10^{-2} V_{rup} (pin)^{7/6} = \frac{W_{Dop}}{4} \quad (\mu m) \quad (31)$$

una vez determinado el dopaje óptimo, es conveniente conocer la resistividad de esta región central, que será la resistividad del sustrato ó de la oblea de partida. Este valor puede ser calculado

con la ecuación siguiente:

$$\rho = \frac{1}{q N_D} \frac{3.75 \times 10^{15} + N_D^{0.01}}{5 \times 10^{10} + N_D^{0.01}} \quad (\Omega\text{-cm}) \quad (32)$$

esta expresión puede simplificarse si el valor de  $N_D$  es pequeño ( $< 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) a la ecuación siguiente:

$$\rho = 4.6875 \times 10^{15} / N_D \quad (\Omega\text{-cm}) \quad (33)$$

En la figura (5) se presentan las gráficas de las ecuaciones (27) y (31) donde se muestra el ancho de la región central y el dopaje en función de la tensión de ruptura de la estructura pin.

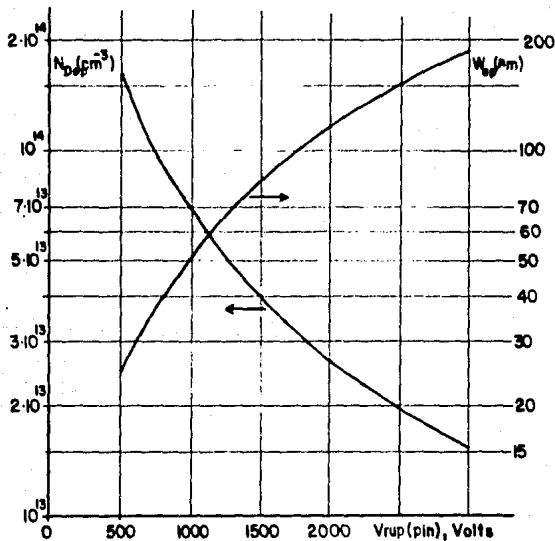


Fig. 5.- Dopaje y ancho de la región central para el caso "óptimo" en función de la tensión de ruptura de estructura pin.



De esta figura y de consideraciones tecnológicas puede entenderse que los rectificadores deben optimizarse para una tensión mínima de  $V_{rupmin}(pin) \geq 1750$  volts lo cual implica una región central mínima de  $100 \mu m$  y una resistividad de sustrato mínima de  $150 \Omega - cm$ . Optimizar estructuras pin a tensiones de ruptura inferiores a este valor implica manejar obleas muy delgadas lo cual no es práctico. De hecho, todos los rectificadores comerciales están diseñados a tensiones de ruptura muy altas. Además, los rectificadores aumentan sensiblemente su valor comercial al aumentar su tensión de ruptura.

En las estructuras pin usuales en dispositivos, se aplica con una buena precisión las suposiciones hechas anteriormente. Otra aproximación como la gradual no se aplica y no son necesarios cálculos numéricos que tomen en cuenta el perfil de impurezas debido a la difusión.

## 2-1-2) Contorno de los rectificadores.

En este tipo de rectificadores de alta potencia es común el biselar la orilla de los dispositivos mecánicamente. La figura (6) muestra los dos tipos de biseles mecánicos que se pueden construir:

**Biselado negativo :** en este caso el área del dispositivo disminuye conforme el dopaje aumenta o sea, conforme se desplaza uno de la región poco dopada a la región muy dopada tratándose de la unión pn.

Biselado positivo: en este caso el área del dispositivo disminuye conforme el dopaje disminuye.

El biselado usual en dispositivos de potencia es el positivo debido a que disminuye el campo eléctrico en la superficie. Para asegurarse que la ruptura se presente en el volumen es conveniente reducir al 50 % al menos el campo eléctrico en la superficie. Lo anterior se logra con un ángulo máximo de biselado de  $50^\circ$ . La figura (7) muestra una curva normalizada del campo eléctrico en función del ángulo de biselado.

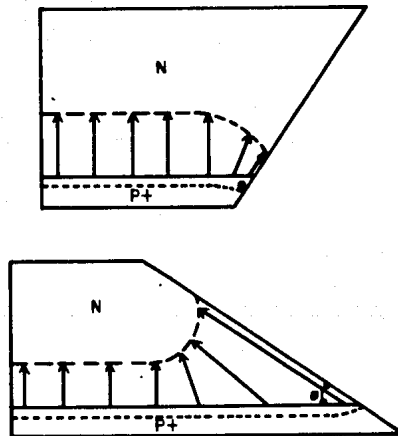


Fig. 6.- La figura superior muestra una unión pn con bisel negativo y la inferior con uno positivo. Se muestra también la geometría de la región de deserción.

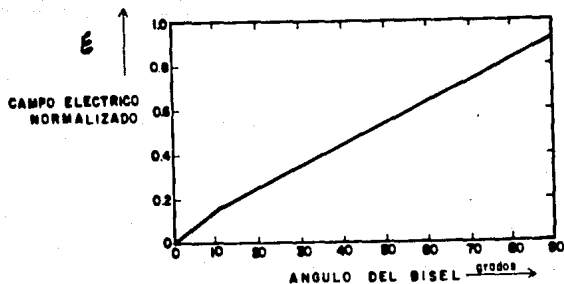


Fig. 7.- Campo eléctrico normalizado en la superficie en función del ángulo de biselado.

La selección del ángulo del biselado está sujeta también a otros criterios como lo siguientes:

i) Se requiere un ángulo pequeño tal que el área lateral sea " grande " y se facilite la colocación del hule de pasivación.

ii) El ángulo no debe ser tan pequeño que aumente innecesariamente la superficie del dispositivo.

iii) Un ángulo también muy pequeño implicaría orillas muy frágiles.

Un compromiso entre estos cuatro criterios indica que un ángulo entre  $35^{\circ}$  y  $40^{\circ}$  podría ser el más adecuado.

2-2) Diseño de los rectificadores en polarización directa.

La característica teórica de corriente v.s. voltaje (I-V) de los rectificadores se puede conocer mediante cálculos, partiendo de la teoría de la unión P-N y tomando en cuenta el tipo de dispositivo que se analiza para poder establecer ciertas condiciones de frontera.

El objetivo de esta sección se centra en la determinación de la caída de voltaje de un diodo tipo PIN a ciertas densidades de corriente en situaciones muy cercanas a las prácticas, para optimizar el diseño geométrico y tecnológico de un rectificador.

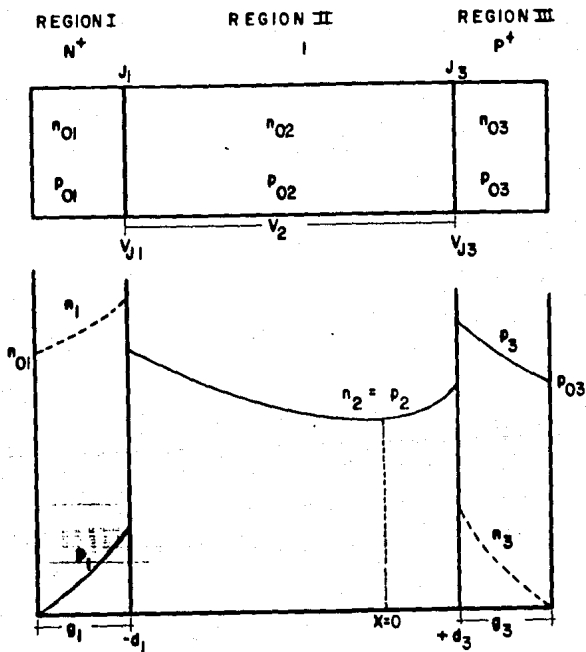


Fig. 8.- Estructura de diodo PIN y su distribución de portadores en alto nivel de inyección.

De la figura (8), se definen los siguientes parámetros:

- $n_{01,2,3}$  = concentración en equilibrio de electrones en las regiones 1, 2 y 3.
- $P_{01,2,3}$  = concentración en equilibrio de huecos en las regiones 1, 2 y 3.
- $n_{1,2,3}$  = concentración de electrones en las regiones 1, 2 y 3.
- $P_{1,2,3}$  = concentración de huecos en las regiones 1, 2 y 3.
- $g_{1,3}$  = espesor de las regiones 1 y 3.
- $V_{j1}$  = caída de voltaje de la unión  $N^+I$ .
- $V_{j2}$  = caída de voltaje de la unión  $I P^+$ .
- $V_s$  = caída de voltaje de la región 2.

La deducción de las ecuaciones que servirán para modelar el comportamiento eléctrico en polarización directa en un régimen de alto nivel de inyección con dispersión portador-portador en la región intrínseca, se basa en las siguientes suposiciones, para una estructura como la de la figura (8):

- a) Las uniones son abruptas.
- b) Los portadores están en equilibrio termodinámico y su concentración obedece la estadística Boltzmann.
- c) El ancho de la región de carga espacial en polarización directa es muy pequeña y se desprecian los mecanismos de recombinación en esta región.
- d) Las movilidades y tiempos de vida de los portadores son independientes de la posición.

A continuación se plantearán las condiciones de frontera y la secuencia matemática para llegar a la ecuación diferencial a resolver, así como las ecuaciones finales de corriente, campo eléctrico y voltaje obtenidas de las condiciones de frontera, procurando minimizar las justificaciones, ya que estas se encuentran ampliamente explicadas en la referencia [2], en la cual se basan los cálculos que aquí se realizan, pero se introducen algunas modificaciones al procedimiento.

Como se puede ver en la figura (8), la distribución de portadores en la región intrínseca no es simétrica y esto se debe a la diferencia de movilidades de huecos y electrones. Además se establece que  $x = 0$  donde  $dn_2/dx = dp_2/dx = 0$ , teniéndose las regiones  $-d_1, 0$  y  $0, +d_2$ .

Con lo anterior en mente, la concentración de portadores y la magnitud del campo eléctrico serán:

$$\left. \begin{aligned} P_2(x = 0^-) &= P_2(x = 0^+) \\ n_2(x = 0^-) &= n_2(x = 0^+) \end{aligned} \right\} \text{ en } x = 0 \quad (34)$$

y en base a las relaciones de Boltzmann se tiene que:

$$\left. \begin{aligned}
 P_1(d_1) &= \frac{n_{01}}{e^{2y_1} - 1} \\
 N_1(d_1) &= \frac{n_{01}}{1 - e^{-2y_1}} \\
 P_2(d_1) = N_2(d_1) &= \frac{n_{01}}{2 \sinh y_1}
 \end{aligned} \right\} \text{en } x = -d_1 \quad (35)$$

$$\left. \begin{aligned}
 N_2(d_2) &= \frac{P_{02}}{e^{2y_2} - 1} \\
 P_2(d_2) &= \frac{P_{02}}{1 - e^{-2y_2}} \\
 P_2(d_2) = N_2(d_2) &= \frac{P_{02}}{2 \sinh y_2}
 \end{aligned} \right\} \text{en } x = +d_2 \quad (36)$$

Además:

$$\left. \begin{aligned} P_1(g_1) &= 0 & \text{en } x &= - (d_1 + g_1) \\ N_2(g_2) &= 0 & \text{en } x &= (d_2 + g_2) \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

y en las relaciones anteriores se tiene que:

$$y_1 = \frac{q}{k T} (\phi_{j1} - V_{j1}) \quad (38)$$

$$y_2 = \frac{q}{k T} (\phi_{j2} - V_{j2}) \quad (39)$$

$$\phi_{j1} = \frac{k T}{q} \ln \frac{n_{o1} P_{o2}}{n_i^2} \quad (40)$$

$$\phi_{j2} = \frac{k T}{q} \ln \frac{P_{o2} n_{o2}}{n_i^2} \quad (41)$$

Para deducir la ecuación que dará el comportamiento del rectificador, se parte de las ecuaciones de densidad de corriente para huecos y electrones:



$$J_n = q \mu_n n \mathcal{E} + q D_n \frac{dn}{dx} \quad (42)$$

$$J_p = q \mu_p p \mathcal{E} - q D_p \frac{dp}{dx} \quad (43)$$

Derivando las ecuaciones (42) y (43) con respecto a  $x$  y de la ecuación de recombinación se obtiene:

$$\frac{dJ_n}{dx} = q R \quad (44)$$

$$\frac{dJ_p}{dx} = -q R \quad (45)$$

donde, para alto nivel de inyección  $R$  se puede expresar de la siguiente manera:

$$R = \frac{P}{\tau} \quad (46)$$

donde  $\tau$  es el tiempo de vida ambipolar, relacionado con la longitud de difusión ambipolar, con la siguiente ecuación:

$$L = \sqrt{D \tau} \quad (47)$$

de esta manera, relacionando las ecuaciones (42)-(47), se obtiene la ecuación diferencial que expresa la distribución de portadores en la región intrínseca:

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = \frac{P}{L^2} \quad (48)$$

En la ecuación (47),  $D$  es el coeficiente de difusión ambipolar, que se expresa como :

$$D = \frac{2 D_n D_p}{D_n + D_p} \quad (49)$$

donde  $D_n$  y  $D_p$  son los coeficientes de difusión de electrones y de huecos, respectivamente.

La ecuación (48) se puede resolver utilizando las condiciones de frontera planteadas anteriormente ( 34, 35, 36 y 37 ), de donde se obtiene la distribución de portadores de las regiones 1, 2 y 3:

$$P_1(x) = P_1(d_1) \operatorname{csch} \frac{g_1}{L_1} \operatorname{senh} \frac{x + g_1 + d_1}{L_1} \quad (50)$$

$$P_2(x) = P_2(d_1) \operatorname{sech} \frac{d_1}{L_1} \cosh \frac{x}{L_2} \quad (51)$$

$$n_2(x) = N_2(d_2) \operatorname{csch} \frac{g_2}{L_3} \operatorname{senh} \frac{x - g_2 - d_2}{L_2} \quad (52)$$

En las ecuaciones anteriores, el subíndice indica la región a la cual se aplica el parámetro que lo lleva.

Ahora bien, para poder continuar con los cálculos, es necesario determinar valores de  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $d_1$  y  $d_2$ , donde los dos primeros valores se refieren a la polarización de las uniones y los dos siguientes a las dos zonas en que se divide la región 2. Utilizando la propiedad de que la corriente debe ser continua a lo largo del dispositivo y con las condiciones de frontera establecidas en (34), se deduce la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\operatorname{senh} y_1} \frac{n_{01}}{p_{02}} \left[ z_1 e^{-y_1} + (1 + m_2) \coth \left( \frac{W_{op}}{2 L_2} \right) \right] =$$

$$\left[ z_2 e^{-y_2} + (1 + m_2) \coth \left( \frac{W_{op}}{2 L_2} \right) \right] \frac{1}{\operatorname{senh} y_2} \quad (53)$$

donde:

$$m_2 = \frac{D_{n2} - D_{p2}}{D_{n2} + D_{p2}} \leq 0.5$$

$$z_1 = \frac{L_2}{C_1 L_1}$$

;

$$z_3 = \frac{L_2}{C_3 L_3}$$

$$C_1 = \frac{D_{n2}}{D_{n1}} = \frac{D_{p2}}{D_{p1}}$$

;

$$C_3 = \frac{D_{n2}}{D_{n3}} = \frac{D_{p2}}{D_{p3}}$$

Para fines prácticos y con aceptable exactitud,  $m_2$  se puede tomar como 0.5,  $z_1 = z_3 = \sqrt{\tau_2 / \tau_1}$ , donde  $\tau_2$  es el tiempo de vida en la región 2 y  $\tau_1$  es el tiempo de vida en la región 1.

Por otro lado, de la ecuación (53), se puede observar que cuando  $n_{o1} = P_{o3}$ , se tiene que  $y_1 = y_3$  y  $d_1 = d_3$ , lo que ilustraría a un rectificador llamado simétrico. Sin embargo, cuando  $n_{o1}$  es diferente a  $P_{o3}$ , la ecuación (53) se habrá de resolver gráficamente ó por iteración para encontrar el valor de  $y_3$  para un valor dado de  $y_1$ .

A bajas densidades de corriente,  $y_1$  es grande y va disminuyendo conforme aumenta la densidad de corriente. Para trazar una gráfica de I-V que abarque unos cuatro órdenes de magnitud desde bajas hasta altas densidades de corriente, se puede comenzar con  $y_1 = 10$  e ir decrementando su valor hasta 1, por ejemplo. Cada par  $y_1 - y_3$ , corresponderá a un punto en la gráfica.

A continuación, una vez conocido cada par  $y_1 - y_3$ , con las ecuaciones (35) y (36) se encuentran  $P_2(d_1)$  y  $P_2(d_3)$  y si el valor de  $W_{op}$  ya fue calculado con el procedimiento de la sección (2-1-1), entonces se puede conocer el valor de  $d_2$  utilizando la ecuación siguiente:

$$\tanh \frac{d_2}{L_2} = \coth \left( \frac{W_{op}}{L_2} \right) - \operatorname{csch} \left( \frac{W_{op}}{L_2} \right) \left[ \frac{P_2(d_1)}{P_2(d_3)} \right] \quad (54)$$

y por lo tanto:

$$d_1 = W_{op} - d_2 \quad (55)$$

Al hacer los cálculos, se observará que  $d_1$  va aumentando conforme aumenta la densidad de corriente, lo que equivale a que el punto donde  $dn_2/dx = 0$ , se vaya trasladando hacia la unión  $J_3$ .

Una vez conocidos  $y_1$ ,  $y_3$ ,  $d_1$  y  $d_2$  y recordando que la corriente debe ser continua en todo el dispositivo, se hace la siguiente evaluación en las ecuaciones (42) y (43):

$$J_{n1} \Big|_{x = -d_1} = J_{n2} \Big|_{x = -d_1}$$

$$J_{p1} \Big|_{x = -d_1} = J_{p2} \Big|_{x = -d_1}$$

de donde se obtiene la expresión para el campo eléctrico en la unión  $J_1$

$$\mathcal{E}_2(d_1) = \frac{k T}{q L_2} \left[ e^{-y_1} z_1 \coth \left( \frac{d_1}{L_1} \right) + \tanh \left( \frac{d_1}{L_2} \right) \right] \coth y_1 \quad (56)$$

y la expresión para la densidad de corriente total:

$$J = \frac{q^2 D_2 n_{01}}{k T \sinh y_1} \left[ \mathcal{E}_2(d_1) + \frac{k T}{q} \frac{m_2}{L_2} \tanh \frac{d_1}{L_2} \right] \quad (57)$$

que servirá para encontrar una de las coordenadas de la gráfica que se desea realizar. En esta ecuación,  $D_2$  es el coeficiente de difusión ambipolar y que cuando se toma en cuenta el fenómeno de dispersión portador-portador, disminuirá notablemente con una densidad de portadores inyectados mayor a

$10^{17} \text{ cm}^{-3}$  por lo que para obtener resultados más reales, habrá que considerar esta disminución.  $D_2$  se puede expresar por:

$$D_2 = \frac{2 D_{n2} D_{p2}}{D_{n2} + D_{p2}} \quad (58)$$

donde:

$$D_{n,p} = \frac{k T}{q} \mu_{n2,p2} \quad (59)$$

Las movilidades debido a impurezas ionizadas se encuentran con las siguientes expresiones [3] :

$$\mu_n = \frac{5.10 \times 10^{18} + 92 N_D^{0.91}}{3.75 \times 10^{15} + N_D^{0.91}} \quad (60)$$

$$\mu_p = \frac{2.90 \times 10^{15} + 47.7 N_a^{0.76}}{5.86 \times 10^{12} + N_a^{0.76}} \quad (61)$$

donde:

$$N_D = \text{concentración en la región 2 y } N_a = \frac{n_i^2}{N_D} \quad \text{para}$$

nuestro caso.

Pero cuando se tienen los dos tipos de portadores, como es en el de alto nivel de inyección ( $n = p$  por neutralidad de carga), se presenta además disminución por efecto de la dispersión portador-portador en la movilidad, lo que se toma en consideración con la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\mu_{n2}, \mu_{p2}} = \frac{1}{\mu_0} + \frac{\Delta n \ln ( 1 + 4.54 \times 10^{11} \Delta n^{-0.667} )}{1.428 \times 10^{20}} \quad (62)$$

donde  $\mu_0$  será  $\mu_n$  ó  $\mu_p$  y  $\Delta n$  será  $P_2(d_1)$ . De esta manera, conociendo las movilidades con cierta inyección de portadores ya se puede calcular con (58) y (59) el coeficiente de difusión ambipolar incluyendo la dispersión portador-portador.

Como siguiente paso, se requiere conocer la otra coordenada, que es el voltaje y al igual que se obtuvo la ecuación (57), se deduce la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \xi_2(x) = & \left[ \xi_2(d_1) \cosh (d_1/L_2) + \frac{m_2}{L_2} \frac{k T}{q} \sinh (d_1/L_2) \right] * \\ & * \operatorname{sech} (x / L_2) + \frac{m_2}{L_2} \frac{k T}{q} \tanh (x / L_2) \end{aligned} \quad (63)$$



la cual si se integra se obtiene la caída de voltaje entre  $d_1$  y cero:

$$V_{(d_1, 0)} = \int_{d_1}^0 \mathcal{E}_2(x) dx \quad (64)$$

resultando en:

$$V_{(d_1, 0)} = 2 L_2 \left[ \mathcal{E}_2(d_1) + \frac{n_2}{L_2} \frac{k T}{q} \tanh(d_1 / L_2) \right] + \\ + \cosh(d_1 / L_2) \left[ \frac{\pi}{4} - \tan^{-1} \left( \exp(-d_1 / L_2) \right) \right] \quad (65)$$

Faltaría entonces, encontrar la expresión para la caída de voltaje entre 0 y  $d_3$ , lo cual se hace de la misma forma como se encontró la ecuación (65). Únicamente se cambia en la ecuación (56) los subíndices 1 ( región 1 ) por el subíndice 3 ( región 3 ) al igual que en la ecuación (63) para obtener  $V_{(0-d_3)}$  que será similar a la ecuación (65).

Finalmente, se obtienen las caídas de voltaje de las uniones  $J_1$  y  $J_3$  por medio de las ecuaciones (33) - (41) y se calcula la caída de voltaje total:

$$V_f = V_{(d_1,0)} + V_{(0-d_2)} + V_{j_1} + V_{j_2} \quad (66)$$

De esta manera, procediendo secuencialmente en el cálculo de  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $\mathcal{E}_2(d_1)$ ,  $\mathcal{E}_2(d_2)$ ,  $D_2$ ,  $J$  y  $V_f$  se generará la curva característica I-V, para un rectificador de potencia con estructura PIN, con el fenómeno de dispersión portador-portador incluido, lo cual se presenta en la práctica.

#### Aspectos prácticos del diseño.

Existen algunos aspectos importantes que es necesario remarcar, relacionado con las ecuaciones que se presentaron en la sección anterior, respecto a la optimización del diseño del rectificador, en cuanto a que se requiere que la caída de voltaje  $V_f$  debe ser minimizada para disminuir la disipación de potencia del diodo.

Analizando la ecuación (65), se puede ver que existe una dependencia exponencial con respecto a la razón  $d_1/L_2$ , por lo que la caída de voltaje se puede ver grandemente incrementada si esta razón es grande, ó lo que equivaldría a tener un ancho de la región 2 mucho más grande que la longitud de difusión  $L_2$ . Por otro lado, si el voltaje de ruptura deseado para el dispositivo implica una  $W_{op}$  mayor de 100  $\mu\text{m}$ , como se dedujo en la sección (2-1-1), se vuelve un requisito indispensable conservar una longitud de difusión  $L_2$  grande y esto se logra con una tecnología adecuada.

En el mismo sentido de disminución de la caída de voltaje, también se puede apreciar que  $V_{(d_1-d_2)}$  depende directamente de  $\xi_2(d_1)$  (de la misma forma  $V_{(0-d_2)}$  y  $\xi_2(d_2)$ ) en consecuencia, tiene que minimizarse. Así que analizando la ecuación (56), se ve que para valores dados de  $d_1/L_2$  y  $y_1$ , esto se puede lograr cuando  $\coth(g_1/L_1) = 1$  ó bien  $g_1/L_1 \geq 3$ , lo que indica que en la práctica, la dimensión  $g_1$  ó  $g_2$  de las zonas  $N^+$  y  $P^+$  sean igual ó mayor a 3 veces las longitudes de difusión en esas zonas ( $L_1$  y  $L_2$ ).

### 3.- Conclusiones.

Las conclusiones importantes de este capítulo son las siguientes:

i) Se determinó con precisión el tipo de uniones ( abrupta ó graduales ) mediante el uso de un criterio simple.

ii) Obtención de las curvas de diseño ( fig. 5 ) mediante dos ecuaciones con lo cual se selecciona con suma facilidad el dopaje y el ancho de la región central dependiendo de la tensión de ruptura deseada.

iii) Selección de un ángulo de biselado en función de cuatro criterios.

iv) Se establece un procedimiento para modelar el comportamiento eléctrico de los rectificadores.

v) Tratar de conservar una longitud de difusión grande en la región de alta resistividad, congruente con el alto voltaje de ruptura deseado.

vi) Tener regiones  $N^+$  y  $P^+$  muy anchas para conservar un espesor práctico del dispositivo y disminuir la caída de voltaje  $V_r$ .

Con lo anterior, la estructura óptima para una cierta aplicación puede determinarse con precisión, facilidad y hasta cierta elegancia.

Es común por ejemplo hasta confundir el tipo de unión que se maneja en dispositivos de potencia.

Cabe observar que el diseño aquí presentado es original y es una herramienta poderosa en la fabricación de rectificadores desde 1A hasta miles de amperes.

## CAPITULO I I

### DESCRIPCION DE LA TECNOLOGIA DE RECTIFICADORES 1N4000.

Para fabricar rectificadores de algún tipo industrial deben satisfacerse diversos requerimientos como:

- Cumplir con características eléctricas que sean confiables.
- Compatibles con los procesos de encapsulamiento disponibles.
- Económicos.

De lo cual normalmente en dispositivos de laboratorio se ocupa uno poco.

Las etapas para fabricar rectificadores 1N4000 de tipo industrial son las siguientes:

- 1.- Material de partida.
- 2.- Difusión de tipo n.
- 3.- Eliminación de la difusión tipo n de una de las caras.
- 4.- Difusión de tipo p.
- 5.- Metalización.
  - 5-1) Grabado de níquel.
  - 5-2) Fotolitografía por las dos caras de la oblea.
  - 5-3) Estañado.
- 6.- Separación química de dispositivos.
- 7.- Pasivación.

## 1.- MATERIAL DE PARTIDA.

Se parte de obleas de silicio de orientación (111), del tipo de zona flotante (libre de dislocaciones), de conductividad tipo n, muy poco contaminada de resistividad 300  $\Omega$ -cm, un espesor de 350  $\mu$ m y un diámetro de 2 pulgadas.

Para asegurar una buena adherencia de la metalización al silicio, es necesario que las obleas de silicio tengan un terminado "sand-blasting". En el caso de que estas superficies estuvieran pulidas, se procede a realizar un texturizado homogéneo.

## 2.- DIFUSION DE TIPO N.

Normalmente la difusión se realiza en dos etapas:

El depósito que se realiza a una temperatura comprendida entre 800°C y 1100°C usualmente, en una atmósfera donde haya compuestos que contengan a la impureza que se difundirá en el silicio. En esta etapa lo que se desea es tener una gran densidad de impurezas en un volumen pequeño.

La redistribución es la segunda etapa la cual se realiza a una temperatura mayor comprendida entre 900°C y 1200°C y en una atmósfera oxidante. Lo que se desea ahora es que las impurezas se redistribuyan en un volumen mucho mayor y disminuir también la densidad de las mismas.

La distribución de impurezas que se tiene después del depósito es la siguiente:

$$C(x,t) = C_0 \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2 \sqrt{D t}} \right]$$

donde:

$C_0$  = solubilidad sólida de la impureza en el silicio.

$D$  = coeficiente de difusión de la impureza.

$t$  = tiempo del depósito.

La distribución de impurezas que se tiene después del proceso de redistribución es la siguiente:

$$C(x, t_2) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp(-x^2/4D_2 t_2)$$

donde:

$Q$  = cantidad de impurezas depositada por unidad de superficie.

$D_2$  = coeficiente de difusión de la impureza en esta etapa de redistribución.

$t_2$  = tiempo de la redistribución.

Dos parámetros para una primera caracterización de las difusiones son:

- resistencia de hoja ó de cuadro
- profundidad de unión

los cuales se pueden medir con cierta facilidad y precisión.

En esta difusión de tipo n se deposita fósforo teniendo como fuente de impurezas al oxitricloruro de fósforo. La redistribución se realiza a muy alta temperatura y durante tiempos largos para tener una resistencia de hoja de 0.2  $\Omega$  y una profundidad de unión de 80  $\mu\text{m}$ . La figura (1) muestra un esquema de la oblea de silicio después de este tratamiento térmico. Después de un proceso de difusión se tiene una capa de óxido de silicio crecido intencionalmente.

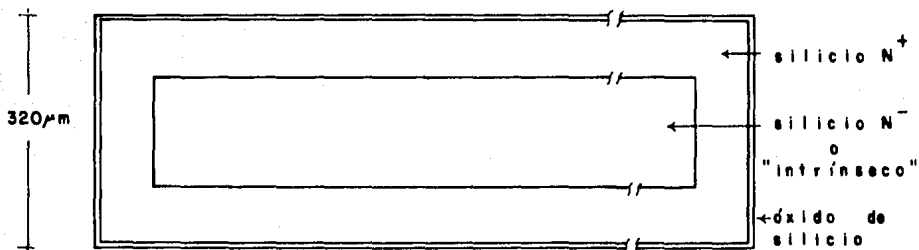


Fig. 1.- Oblea de silicio después de la difusión de tipo n.

### 3.- ELIMINACION DE LA DIFUSION DE TIPO N DE UNA DE LAS CARAS.

En este proceso se elimina la difusión tipo n de una de las caras y al mismo tiempo se ajusta el espesor final del silicio al valor deseado. Este espesor final interviene en las características eléctricas de los dispositivos.

El espesor que se elimina es alrededor de 100 μm para obtener un espesor final entre 210 y 220 μm. Este devaste actualmente se realiza químicamente teniendo mucho cuidado en lo siguiente:

- 1) Uniformidad del espesor final de la oblea.
- 2) Control de la velocidad de ataque.
- 3) Ausencia de patrones que se forman por la cinética de la solución.

Para lograr lo anterior se requiere al menos cumplir



con lo siguiente:

- 1) Control de la temperatura de la solución atacante.
- 2) Control de las rpm del vaso conteniendo la solución atacante.
- 3) Fijar la muestra adecuadamente, la cara posterior se está protegiendo con una mezcla de cera y de goma.

La estructura que se obtiene después de este ataque químico es la mostrada en la figura (2). Previo al ataque químico del silicio, se debe eliminar la capa de óxido de silicio en una solución de ácido-fluorhídrico.

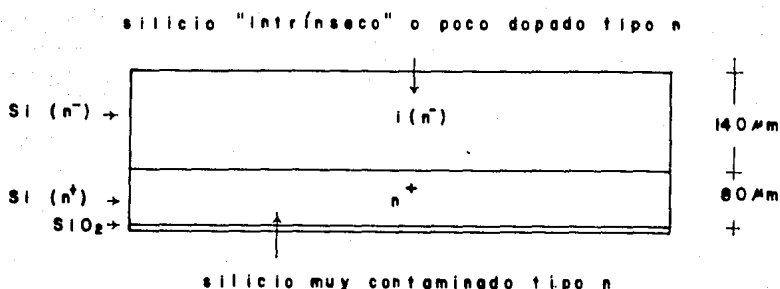


Fig. 2.- Estructura resultante después de la eliminación de la difusión tipo n de una de las caras.

#### 4.- DIFUSION DE TIPO P.

Para terminar de formar la estructura pin (ver figura 2) se necesita realizar una difusión de boro por la cara a la cual se le eliminó la primera difusión tipo n de fósforo. Lo anterior se logra fácilmente al disponer del  $SiO_2$  que evita que el boro se

difunda a la superficie difundida previamente. Esta difusión se realiza a una temperatura de  $1200^{\circ}\text{C}$  teniendo como profundidad de unión  $50\ \mu\text{m}$  y una resistencia de hoja de  $1.8\ \Omega$ . La estructura pin que se obtiene se muestra en la figura (3). Este dispositivo es uno de base angosta, por lo cual el ancho de la región "intrínseca" interviene en la determinación de la tensión de ruptura y por consiguiente, el espesor final también.

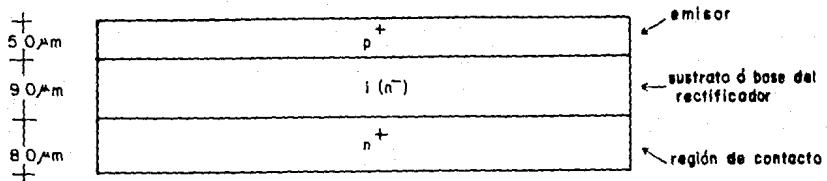


Fig. 3.- Estructura pin que conforma la parte activa de un rectificador 1N4000.

#### 5.- METALIZACION.

Para manejar eléctricamente la estructura pin (ver figura 3) ó cualquier otro dispositivo ó circuito integrado, normalmente la primera etapa consiste en depositar una capa metálica delgada consistente de uno ó más metales. La metalización propuesta para estos rectificadores consiste de tres capas:

0) Para asegurar una buena adherencia de las

metalizaciones a la oblea de silicio se requiere que las superficies sean muy rugosas, con terminado "sand-blasting". En el caso de dudar de tener una textura adecuada ó de que se tuviera algún óxido contaminado u otro compuesto que no se pueda disolver con ácido fluorhídrico, se vuelve necesario realizar un proceso de devaste ó de texturizado con la arenadora.

A) Depósito químico autocatalítico (electroless) de una capa muy delgada de paladio la cual tiene como finalidad promover la adherencia de la capa subsecuente.

B) Depósito químico autocatalítico de níquel. Esta capa permite un depósito sencillo de la metalización subsecuente, la cual va a servir para fijar las terminales de cobre.

C) Depósito de una aleación de plomo-estaño mediante la inmersión de las obleas ya niqueladas en esta aleación fundida. Esta aleación se deposita únicamente donde existe níquel. La película de níquel se grabó previamente definiéndose motivos cuadrados con las esquinas redondeadas. Estos motivos cuadrados estañados definirán el tamaño de los rectificadores.

Con esta metalización que incluye la colocación de una soldadura de plomo - estaño se dispone de una presentación fácil y económicamente encapsulable.

#### 5-1) Niquelado.

Se deposita níquel en las dos caras de la oblea de silicio para tener contacto a las regiones tipo p y n fuertemente contaminadas. El método de depósito de níquel que ofrece mayores ventajas es el químico, mediante el cual se

depositan alrededor de 2  $\mu\text{m}$  de espesor. Se usó un baño autocatalítico alcalino (electroless) para este proceso.

#### 5-2) Fotolitografía por las dos caras de la oblea.

En la inmensa mayoría de las aplicaciones de fotolitografía en semiconductores, ésta se realiza únicamente por una de las superficies ya que usualmente los dispositivos son de superficie (tienen una profundidad muy pequeña comparada con el espesor total de la oblea).

En el caso de los rectificadores y de otros dispositivos de potencia, existen varios tipos que son dispositivos de volumen, es decir, que para un funcionamiento óptimo se requiere de todo el espesor de la oblea. En la figura (4) se muestra un bosquejo de la sección transversal de una oblea

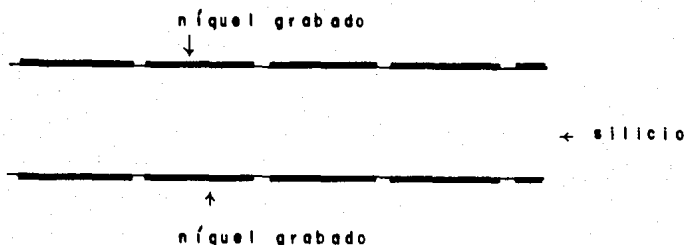


Fig. 4.- Sección transversal de una oblea de silicio con el níquel ya grabado.

de silicio a la cual se le depositó paladio primero, después

níquel y al final, se realizó un proceso de fotolitografía grabando al níquel.

El proceso de fotolitografía se realiza con técnicas convencionales usando resinas sensibles a la luz ultravioleta. El aspecto nuevo es el de tener que alinear perfectamente las dos máscaras con una tolerancia pequeña ( $\pm 10 \mu\text{m}$ ).

Para poder realizar este proceso correctamente, se diseñó una alineadora de doble máscara (ver fig. 5) con movimientos x, y,  $\theta$ , z así como incluyendo amortiguamientos en los desplazamientos que pudieran dañar a alguna de las dos ó a las dos máscaras así como a la oblea de silicio.

Otro aspecto importante es el de poder iluminar simultáneamente por las dos caras de la oblea, lo cual simplificaría este proceso de fotolitografía. Este equipo ya se mandó a contruir.

### 5-3) Estañado.

Una aleación usual para soldar alambres de cobre es la de estaño-plomo por lo cual es la que decidió usarse para fijar las terminales al dispositivo. Dependiendo de la composición de esta aleación, la temperatura de fusión puede variar entre  $183^{\circ}\text{C}$  y  $327^{\circ}\text{C}$ . Para disponer de una tecnología confiable es conveniente seleccionar una aleación con un alto contenido de plomo la cual tenga una temperatura de fusión alta. Además de tener una temperatura de fusión alta, esta aleación tiene una ventaja de ser económica y de presentar una resistencia química alta.

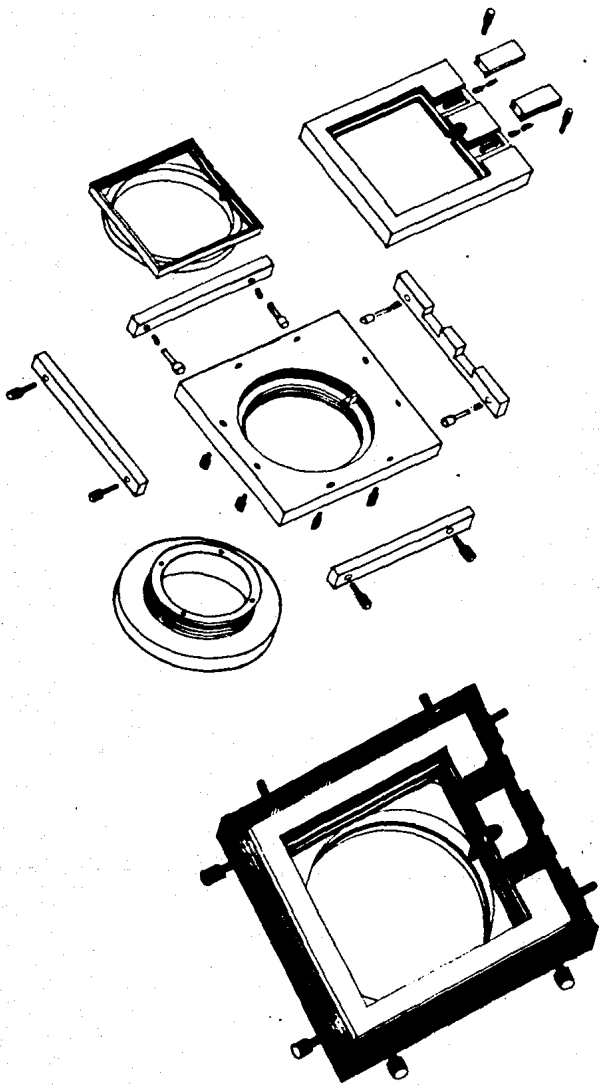


Fig. 5.- Alineadora de doble máscara.

Para realizar este proceso de estañado con facilidad y seguridad, se procedió a diseñar un soporte de cuarzo al cual no se adhiere esta aleación (ver la fig. 6) para introducir las muestras a la aleación fundida de Pb-Sn. Antes de introducir la oblea a la aleación, es necesario que la oblea esté impregnada de algún fundente. Se consiguió un fundente líquido lo cual facilita esta operación.

Con este proceso de estañado integrado a las obleas de silicio, se dispone de rectificadores que se pueden encapsular fácilmente.

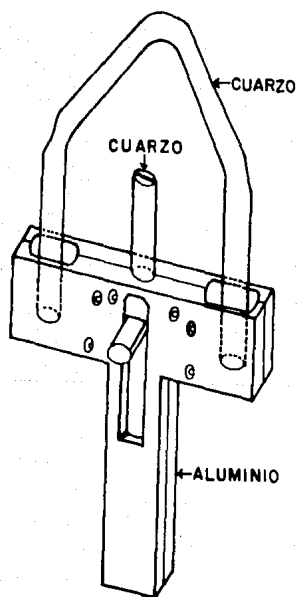


Fig. 6.- Soporte de cuarzo para estañado de rectificadores 1N4000.

La figura (7a) muestra un bosquejo de la sección transversal de estos dispositivos después del estañado así como en la figura inferior (fotografía 7b) se puede observar una de las dos caras de estos rectificadores después del estañado. Es claro que las dos superficies son iguales y que están bien alineadas. Como se mencionó anteriormente, esta soldadura sólo se deposita en los cuadros definidos por la metalización de níquel.

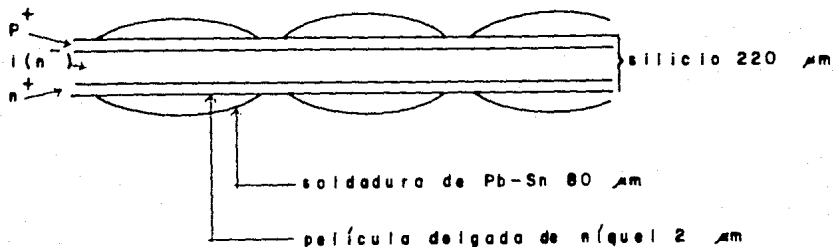


Fig. 7-a) Sección transversal de un rectificador estañado.



Fig.7-b) Fotografía de un rectificador después del estañado.

Fig. 7.- Rectificadores 1N4000 metalizados.



## 6.- SEPARACION QUIMICA DE DISPOSITIVOS.

Los dispositivos se están separando químicamente (ver Capítulo IV Separación Química) atacando al silicio con una solución de ácido nítrico-ácido fluorhídrico-ácido acético y teniendo como material de enmascaramiento a la aleación de plomo-estaño la cual define el tamaño de los rectificadores. Para poder mantenerlos fijos, antes de atacarlos químicamente, se coloca una película de cera-goma en una de las caras lo cual implica que sólo se ataquen por una de las caras.

## 7.- PASIVACION.

Después del grabado químico del silicio, la estructura pin queda totalmente descubierta. Si esta estructura pin se quedara descubierta, las características eléctricas se degradarían muy rápido debido a que esta superficie lateral se contaminaría también muy rápido con la contaminación del medio ambiente, así como con los procesos tecnológicos subsecuentes.

Para que las características eléctricas de los dispositivos no se degraden (estén pasivadas), inmediatamente después del ataque se procede a colocar un material donde anteriormente estaba el silicio descubierta el cual fue atacado. Las características que se desea que este material cubra son las siguientes:

- 1) Una buena adherencia al silicio.
- 2) Una resistencia térmica alta: que a  $400^{\circ}\text{C}$  no se degrade.
- 3) Una resistencia química a solventes: que con xileno no

se degrade.

- 4) Material suave preferentemente para que se facilite el encapsulamiento.
- 5) Material de alta pureza para que no contamine al silicio.
- 6) Que tenga una muy alta resistividad ó que sea un buen aislante.
- 7) De fácil aplicación.

Los materiales adecuados para este uso son los elastómeros de silicio (silicones) algunos de los cuales pueden cumplir con todas estas características.

Estos elastómeros constan de tres componentes: i) hule rojo viscoso, ii) aceite de silicio para adelgazar a este hule, si se considera necesario, iii) catalizador para polimerizar (curar) a este hule de silicio (silicón). Estos dos últimos materiales entran en proporciones pequeñas (0 al 5%). La manera de colocar este hule de silicio es la siguiente:

- 1) Se prepara la mezcla de las tres componentes mencionadas anteriormente teniendo cuidado de revolver rápidamente al catalizador y que la mezcla quede bien homogénea.

- 2) El hule se coloca con una espátula procurando que el estañado quede lo más limpio posible.

En alrededor de 24 horas (dependiendo del porcentaje del catalizador) el hule queda curado con lo cual puede procederse a eliminar la capa de cera-goma, material que sirvió para mantener acomodados temporalmente a los dispositivos mientras se les colocaba el silicón. Este proceso aún no está suficientemente dominado.

Aún cuando se tenga suficiente cuidado, la soldadura de Pb-Sn queda cubierta con una película de "silicón", material que es necesario retirar. Para hacerlo, se intentaron los tres métodos siguientes:

- a) Arenadora (proceso de sand-blasting).
- b) Usando un paño impregnado con el polvo abrasivo que usa la arenadora.
- c) Con lija.

a) Arenadora.

Este método consiste en lanzar polvo abrasivo a alta velocidad a las superficies que se deseen devastar mediante una boquilla operada con aire a alta presión. Los resultados son los siguientes:

i) Proceso puntual ó localizado.

ii) El hule se despega del silicio.

iii) Requiere de mucho tiempo para eliminar el exceso de hule.

b) Paño con polvo abrasivo.

La oblea se sujeta con vacío y se hace girar a bajas rpm acercándole el paño con polvo abrasivo de alúmina. Los resultados fueron los siguientes:

- i) El exceso de hule se puede eliminar.
- ii) El terminado del metal es mate y rayado, blanqueándose la soldadura. Para realizar este proceso, se necesita de una buena succión para evitar que la muestra se esté cayendo. Este método es aceptable.

c) Con lija fina de agua (No. 400 a No. 600).

La oblea se vuelve a colocar en la centrífuga ( ó spinner) haciéndola girar a bajas rpm teniendo cuidado de acercar suavemente la lija a la oblea con los resultados siguientes:

- i) Se elimina bien el hule y en un tiempo breve.
- ii) La metalización de Pb-Sn presenta un terminado metálico brillante.
- iii) El hule permanece adherido al silicio.

Este método resultó de buena calidad y es el que se seleccionó para eliminar el hule en exceso.

La película de cera-goma se disuelve después de haber eliminado el exceso de hule. Con este último proceso de eliminación de la cera, los dispositivos están terminados. Faltaría realizar un análisis exhaustivo sobre estos dispositivos para determinar la calidad de los mismos. La figura (8) muestra un esquema de la sección transversal de estos dispositivos así como la fig. (9) una fotografía de una de las superficies.

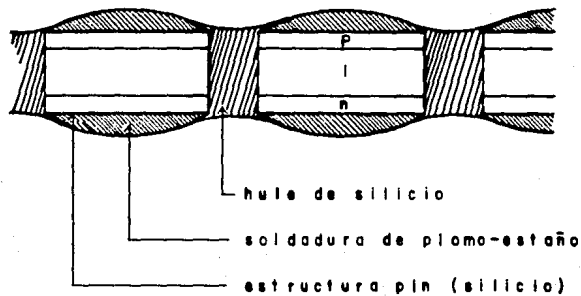


Fig. 8.- Sección transversal de un rectificador IN4000 terminado.



Fig. 9.- Fotografía de la cara inferior (donde estuvo la cera) de un rectificador IN4000 totalmente terminado.

**SELECCION DE UN MATERIAL PARA SOSTENER  
A LOS DISPOSITIVOS.**

Para que los dispositivos conserven el mismo espaciamiento que tenían antes de ser separados químicamente, es necesario colocar una película en una de las caras que los mantenga fijos. Esta película tiene un uso secundario en el sentido en que se disuelve después de que los dispositivos han sido fijados por un hule de silicio. En el caso de que esta película no se usara, el silicio se atacaría por las dos caras y los dispositivos quedarían sueltos (a granel) dificultando la pasivación y el encapsulamiento de los mismos.

El hecho de usar esta película implica que el ataque se realiza únicamente por una de las dos caras, resultando que el tiempo de ataque se duplica aproximadamente.

**1.- CARACTERISTICAS DEL SOPORTE.**

La película que se usará como soporte debe tener las características siguientes:

- i) Ser inerte a la solución atacante del silicio. Esta solución es una mezcla de dos ácidos fuertes y un débil: ácidos fluorhídrico, nítrico y acético.
- ii) Que presente una buena adherencia a la oblea ya estañada.
- iii) Que la temperatura de fusión de la película sea mayor que la temperatura a la cual se realiza el ataque químico del silicio.
- iv) Que sea suficientemente rígida tal que este material no se dañe ó fracture durante la manipulación de estas obleas.
- v) Que esta película se pueda eliminar de tal manera que el hule de silicio no se degrade ó dañe sensiblemente.

## 2.- ESTUDIO DE DIVERSOS MATERIALES.

Los materiales que se estudiaron para la formación de la película fueron los siguientes:

- a) Resina KMER.
- b) Chapopote.
- c) Ceras y gomas.
- d) Mezclas de cera-goma.

A continuación se resume el trabajo hecho con cada uno de estos materiales.

## 2-1) Resina KMER.

La resina KMER es una sustancia líquida fotosensible, la cual se usa habitualmente en procesos de fotolitografía de semiconductores; se colocan algunas gotas en una oblea y en seguida se hace girar con lo cual queda depositada una película muy delgada. Esta película es suficientemente resistente, si se va a grabar algún material a un espesor muy delgado (algunas micras como máximo).

En este caso se desea atacar el silicio a todo el espesor de la oblea, el cual es de  $275 \pm 25 \mu\text{m}$ . Debido a este hecho, se requiere cambiar drásticamente la manera de colocar la resina, pensándose que a medida que se aumente el espesor de esta película, también se aumentará la resistencia química a esta solución atacante del silicio, lo cual resultó cierto.

La manera de colocar ahora esta película es la siguiente:

1) Se colocan ahora mucho más gotas, distribuyendo la resina con la ayuda del mismo gotero ó con un pincel, teniendo cuidado que no se desparrame esta sustancia y que ocupe bien únicamente una cara de la oblea. El espesor se puede controlar con el número de gotas y se trabajó con espesores de 60 a 100  $\mu\text{m}$ .

2) Debido al hecho de que esta película ahora es muy gruesa, hay que dejarla secar lentamente a temperatura ambiente durante más de 12 horas. En el caso de que se le secase como a las películas muy delgadas para fotolitografía con temperaturas altas ( $\sim 80^\circ\text{C}$ ) y tiempos cortos (10 min) se dañaría irremediablemente a estas películas de resina gruesa.



Estas películas de resina después de secarse muestran:

- Una buena adherencia.
- Resistencia mecánica grande.

Después de realizado el ataque, el aspecto es el siguiente:

- Resina reseca, quebradiza sobre todo en la orilla.
- Pierde frecuentemente la planaridad al resecarse.
- La resina presenta una decoloración variable.
- Los dispositivos conservan la buena adherencia.
- La resina presentó una resistencia química variable.

Se decidió no usar este tipo de películas por lo siguiente:

- 1) Deformación de la resina lo cual modifica la separación de los dispositivos y dificulta la colocación del hule.
- 2) Resistencia química variable.
- 3) Dificultad en eliminarla sin dañar el hule de silicio. Para disolverla se requiere por ejemplo xileno caliente.

2-2) Chapopote.

Presenta una resistencia química aceptable con las dificultades siguientes.

- i) Los dispositivos se despegan con cierta facilidad.
- ii) La eliminación completa requiere de una gran cantidad de

xileno.

iii) Su consistencia es viscosa contaminando materiales.

Debido a lo anterior, se decidió no usar este material.

### 2-3) Ceras y Gomas.

Los materiales que se probaron para la formación del soporte fueron los siguientes:

#### 2-3-1) Cera de Abeja.

Se forma esta capa colocando trozos de cera en una oblea la cual está calentándose con una estufa hasta tener un espesor de alrededor de 2 mm para tratar de aumentar la firmeza mecánica de este material. Debe evitarse que este material se desparrame y cubra parte de la cara inferior. Una de las pocas ventajas de esta cera es su muy alta resistencia química, pero con las desventajas siguientes:

- 1) Cera muy suave, adhiriéndose a pinzas por ejemplo.
- 2) Los dispositivos ya separados químicamente, con facilidad se despegan de la cera.
- 3) Se requiere un solvente como el xileno para poderla disolver.

#### 2-3-2) Cera de Campeche.

Es un segregado de un árbol de una consistencia más

rígida que la cera de abeja. Aunque más rígida, se sigue deformando con facilidad con el manejo de las muestras con pinzas. Aún en capas muy delgadas presenta una alta resistencia química. En general el comportamiento es muy parecido al de la cera de abeja.

#### 2-3-3) Cera de Candelilla.

Este material tiene una temperatura de fusión mayor a la de los dos materiales anteriores y también una rigidez mecánica mayor. Su presentación es en hojuelas. Los resultados fueron los siguientes:

- 1) A diferencia de los dos anteriores, es suficientemente rígida y no pegajosa.
- 2) Los dispositivos ya separados químicamente muestran poca adherencia, esta cera se disuelve con xileno caliente.

#### 2-3-4) Cera de Carnauva.

Material de origen vegetal de mayor dureza que la cera candelilla con los resultados siguientes:

- 1) Material quebradizo cuando los dispositivos están fijos, en caso de que se presione.
- 2) Mucho mayor adherencia con respecto a los casos anteriores, pero todavía insuficiente.
- 3) Muy alta resistencia química.

## 2-3-5) Mezclas de Cera-Goma.

### a) Mezcla de cera de campeche-brea.

La brea es una resina natural. Si se tiene poca brea (1 a 1) la película resulta pegajosa y suave y si se tiene mucha brea (9 a 1) resulta una mezcla dura pero quebradiza y frágil y además se degrada en las soluciones atacantes.

### b) Mezcla de cera de candelilla-brea (1 a 1).

Presenta una ligera degradación en las soluciones atacantes y la adherencia de los dispositivos es insuficiente. La película presenta buenas características mecánicas.

## 2-3-6) Gomas.

Se decidió revisar rápidamente diversas gomas para lo cual se realizaron las pruebas siguientes:

- i) Con temperatura la laca y la goma damar se funden y la goma arábiga y la mirra no lo hacen.
- ii) Al solidificar la laca y la goma damar presentaron un aspecto vidrioso y quebradizo similar al de la brea.
- iii) En las soluciones atacantes de los cuatro materiales el único que no se disuelve ó ataca es la goma damar.
- iv) La goma damar se disuelve lentamente en diversos solventes y con ultrasonido acelera su disolución.

## 2-3-7) Mezclas de cera de carnauba-goma.

Se realizaron diversas mezclas de cera de carnauba con las cinco gomas (resinas ó lacas) mencionadas anteriormente obteniéndose mezclas homogéneas sólo con los casos siguientes:

- Cera con brea.
- Cera con goma damar.

Al colocarlas en obleas con motivos estafados muestran buenas características como resistencia mecánica. Después del ataque químico:

- En la mezcla de cera-goma damar aparece una película blanquizca y en la mezcla de cera de segunda-brea, se tiene una capa blanquizca gruesa.
- En las dos mezclas ahora los dispositivos están fuertemente adheridos.
- Las dos películas presentan un buen aspecto visual.

En cuanto a disolución se procuró no usar xileno puro para que esta sustancia no degrade a su vez al hule (silicón) de pasivación. Se usó una mezcla de xileno-acetona en dos proporciones con los resultados siguientes:

- a) Mezcla de xileno-acetona ( 1 a 1 ).  
mezcla cera-damar se disuelve en 1 min a  $\approx 52^{\circ}\text{C}$ .  
mezcla cera-brea se disuelve en 2 min a  $\approx 54^{\circ}\text{C}$ .
- b) Mezcla de xileno-acetona ( 1 a 2 ).  
mezcla de cera-damar se disuelve en 4 min a  $\approx 55^{\circ}\text{C}$ .  
mezcla cera-brea se disuelve en 5 min a  $\approx 55^{\circ}\text{C}$ .

Como última prueba se procedió a realizar el proceso completo para conocer si la mezcla de cera de carnauba con goma damar efectivamente reúne todas las características mencionadas inicialmente ( parte 1 ). El proceso es el siguiente:

- i) Una vez estando la oblea ya estañada, se procede a colocar el soporte formado de esta mezcla de cera de Carnauva-goma de Damar.
- ii) Se separan los dispositivos químicamente atacando el silicio.
- iii) Se coloca el silicón ( un elastómero ) en los canales formados al atacarse el silicio.
- iv) Se procede a disolver esta mezcla de cera de carnauba-goma damar en una solución de xileno-acetona (1 a 1) con los resultados siguientes:
  - a) Los dispositivos siguen firmes en el silicón.
  - b) No se observan cambios en el silicón: textura, color ó rigidez.

Se observó que es preferible depositar la mezcla de cera de carnauba-goma de damar en las obleas estañadas tal como salen del estañado, con bastantes residuos sobre todo del fundente líquido usado. En el caso de que las muestras se limpiaran, la adherencia se vería reducida. La fotografía (1) muestra un dispositivo biselado con la arenadora ( proceso de sand-blasting ) donde se muestra que esta película funciona bastante bien, incluso como película de protección en los rectificadores de alta potencia.

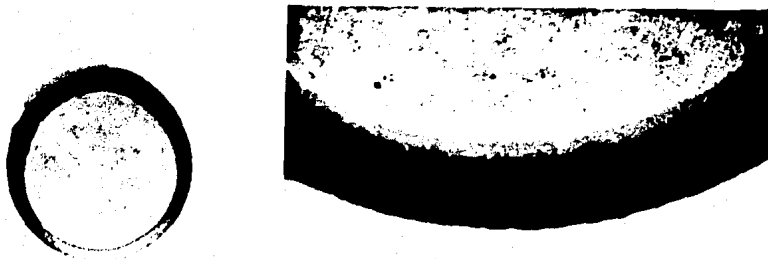


Fig. 1.- Fotografía de un dispositivo biselado con la arenadora cuyas superficies están protegidas con una preparación de cera de carnauba-goma damar ( es la parte clara ).

### 3.- CONCLUSIONES.

Las cinco características mencionadas en el inciso (1) se cumplen, aún cuando al inicio de este breve estudio parecía difícil de lograrse.

El hecho de añadir goma damar a la cera, mejora sensiblemente la adherencia de los dispositivos así como facilita la eliminación de este material una vez colocado el hule rojo de silicio ("un silicón"), sin degradar la muy alta resistencia química que presentan todas las ceras.

## CAPITULO IV

### SEPARACION QUIMICA DE RECTIFICADORES 1N4000.

#### 1.- INTRODUCCION.

La manera tradicional ó convencional de separar dispositivos (ó "chips") es en base a la formación de surcos ó canales muy finos usando un disco de diamante (lo actual) ó usando una punta de diamante (ya en desuso). En el caso de rectificadores, la unión pn quedaría descubierta como se muestra en la fig. (1) y con una calidad cristalina muy pobre debido a la herramienta de corte. Debido a este terminado tan pobre se requiere un devaste químico que elimine la parte maltratada mecánicamente. Para disponer de dispositivos cuya calidad no se degrade, se requiere cubrir con un material especial la parte lateral del dispositivo, el cual aisle la unión pn del medio ambiente.

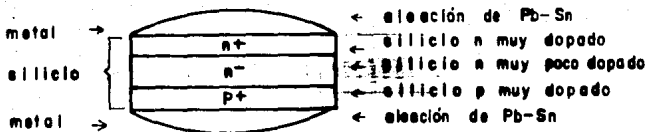


Fig. 1.- Esquema de un rectificador 1N4000.



Al revisar dispositivos comerciales (ver fig. 2) se observó que los dispositivos presentan una coincidencia casi perfecta en el tamaño y la forma del silicio y del metal, aún en algunos dispositivos muy irregulares. Este alineamiento casi perfecto sólo puede explicarse si se separan químicamente usando como película de enmascaramiento para el ataque del silicio a los motivos de Sn-Pb.



Fig. 2.- Fotografía de un dispositivo comercial.

Aún en ataques químicos por inmersión en sustancias líquidas, siempre se tiene un desalineamiento debido a ataques laterales ó a velocidades de ataque diferentes. Lo mencionado anteriormente es difícil de creer; que una aleación de plomo con estaño no se atacara en mezclas de ácidos mientras que el silicio se está atacando a una gran velocidad. Sin embargo, se realizaron de manera exploratoria (y rápida) diversas pruebas que dieran suficiente información para determinar si este ataque selectivo era posible y en caso afirmativo, dedicarle suficiente tiempo para optimizar este proceso.

## 2.- DIFERENTES FORMAS DE SEPARAR DISPOSITIVOS.

Para separar a los rectificadores ó diodos, se debe eliminar el silicio que se encuentra alrededor de los

dispositivos, los dispositivos son definidos por el tamaño de los cuadros de la metalización de estaño-plomo. Los métodos que se pueden intentar son los siguientes:

- a) Separación mecánica.
- b) Separación química.
- c) Separación por una combinación de las dos anteriores.

a) La separación mecánica puede hacerse con cortes muy finos mediante el uso de un disco de diamante. Se está intentando hacer boquillas de un diámetro muy pequeño ( $\phi \approx 0.1\text{mm}$ ) de alúmina para que esta separación mecánica se realice con una arenadora (sand blasting). Se harán diversas pruebas con este último método.

b) El método químico consiste en la eliminación del silicio con sustancias químicas las cuales son generalmente mezclas de ácidos ó bases. Este ataque químico puede realizarse por las dos caras del silicio con lo cual se obtienen dispositivos sueltos ó a granel. En el caso de colocar una película de cera por una de las dos caras, el ataque se realizará únicamente por la cara descubierta quedando los dispositivos fijos en la cera en la misma posición que tenían en la oblea. Lo que se espera de este ataque químico es que no afecte en absoluto la aleación de estaño-plomo.

c) Debido a que se logró una separación química aceptablemente exitosa, podría rayarse el silicio por ejemplo a la mitad del espesor aproximadamente y terminarse la separación químicamente, lo cual puliría la parte tratada mecánicamente para recuperar la calidad del silicio. Esta combinación podría reportar algunas ventajas como una disminución drástica en el ataque lateral, y al estar la muestra menos tiempo en ácidos, que el el metal conserve un estado mucho mejor, así como la posibilidad de sustituir a la cera por un hule con adhesivo.

En el caso de que pudiera usarse un hule con adhesivo, mediante un dispositivo mecánico podría variarse la separación entre dispositivos en un rango importante, lo cual daría una flexibilidad interesante en las etapas posteriores.

### 3.- ATAQUE QUIMICO DEL SILICIO.

Los ataques del silicio con sustancias químicas líquidas son los siguientes:

a) Sustancia a base de etilen -diamina, pirocatecol y agua desionizada.

Presenta una velocidad baja de ataque del silicio, tiene que hacerse en reflujo y ataca fuertemente al metal (estaño + plomo) por lo cual se abandonó rápidamente este método.

b) Sustancia a base de hidróxido de potasio, n-propanol y agua desionizada.

El principal problema es que ataca fuertemente al metal por lo cual se abandonó.

c) Mezcla de ácido nítrico, ácido fluorhídrico y agua desionizada. Se observó que la velocidad del ataque de la aleación de estaño - plomo aumentaba conforme aumentaba el contenido del agua y que el ataque de la aleación no era tan desastroso como en los dos primeros casos.

d) Mezcla de ácido nítrico, ácido fluorhídrico y ácido acético.

En un trabajo exploratorio rápido atacando al silicio por las dos caras, se observó que en algunos casos el metal presentó después de esta separación química un aspecto excelente, sin disminuir en absoluto el espesor de la

aleación de estaño-plomo. El terminado de la aleación de estaño-plomo en algunos casos era mate, en otros obscuro y en otros brillante metálico. Debido a estos resultados iniciales excelentes, se decidió estudiar en detalle este ataque químico.

Las funciones que tienen los ácidos que componen esta solución son las siguientes:

- a) El ácido nítrico oxida al silicio.
- b) El ácido fluorhídrico elimina el óxido de silicio.
- c) El ácido acético tiene la función de regular el poder de oxidación del ácido nítrico.

#### 4.- DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DEL ATAQUE QUÍMICO.

Los primeros ataques químicos se hicieron en un vaso giratorio inclinado con velocidad de rotación fija y lenta sin control de temperatura. La temperatura inicial del ataque era la temperatura ambiente y debido a que la reacción química es exotérmica, conforme avanza el ataque químico, la temperatura va en aumento. Este aumento de la temperatura depende del tamaño de la muestra, de la cantidad de solución, de la velocidad de ataque lo cual imposibilita el control de este proceso.

Por lo anterior se decidió diseñar y construir un nuevo equipo con el cual se logra que el proceso sea reproducible. Las características de este nuevo montaje son las siguientes:

- a) Temperatura constante.  
El vaso con la solución atacante se encuentra girando en otro recipiente (baño maría). A este último recipiente se le añade agua

caliente ó hielo con lo cual se logra controlar la temperatura manualmente con una precisión de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

b) RPM ajustable.

Se colocó un motor de corriente directa al cual al variarle la tensión de alimentación, varía su velocidad de giro. Las rpm se pueden ajustar entre 20 y 400 rpm.

c) Vaso perpendicular.

La primera versión que se diseñó fue con un vaso perpendicular y de un diámetro pequeño ( $\approx 60\text{mm}$ ). La segunda versión, actualmente en construcción, se diseñó con una inclinación ajustable (desde  $90^{\circ}$  ó perpendicular hasta  $45^{\circ}$ ). Las figuras (3, 4) muestran los diagramas de estas dos versiones. La parte inferior del vaso giratorio con inclinación ajustable describe un círculo ó presenta un movimiento de traslación aunado a su movimiento de rotación. Se revisará con cuidado las características de este montaje para que en caso necesario, se diseñe un vaso giratorio a una inclinación dada que no presente este movimiento de traslación.

## 5.- SEPARACION QUIMICA DE DISPOSITIVOS POR LAS DOS CARAS: DISPOSITIVOS A GRANEL.

Inicialmente, la separación química de dispositivos se hizo atacando el silicio por las dos caras estañadas. Los motivos fueron impresos con una alineadora de doble máscara. En la tabla (1) se reportan una serie de ataques con sus características

principales. Algunas observaciones a estos ataques iniciales son las siguientes:

- Con altas concentraciones de ácido fluorhídrico se obtiene la aleación muy oscura ó incluso resulta atacada.
- Con enjuagues de agua la metalización tiende a aclararse.
- Para un proceso dado, muchas veces durante los primeros 10 min. de ataque la aleación resulta de un aspecto excelente y 5 min. después, la aleación resulta muy dañada.
- El silicio lateral presenta diversas formas y texturas,

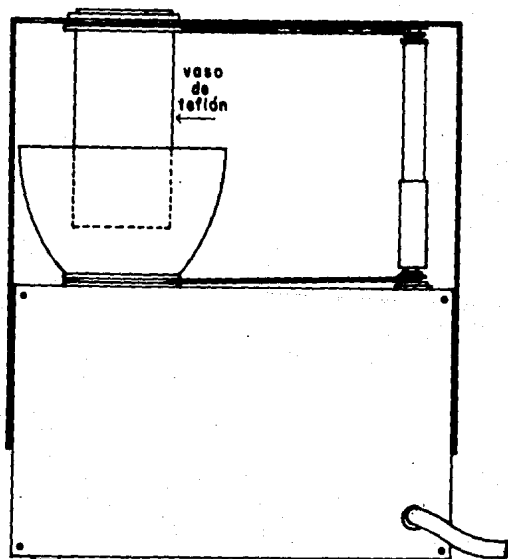


Fig. 3.- Vaso giratorio con temperatura controlada para ataques químicos (vista frontal).

- interesándose más en lo siguiente: silicio pulido espejo observándose en el microscopio de color negro, sin que esté ondulado ó tenga la orilla superior muy irregular.
- En cuanto a forma, se interesa de aspecto vertical que es la geometría que presenta el ataque lateral más bajo (ver el inciso siguiente).

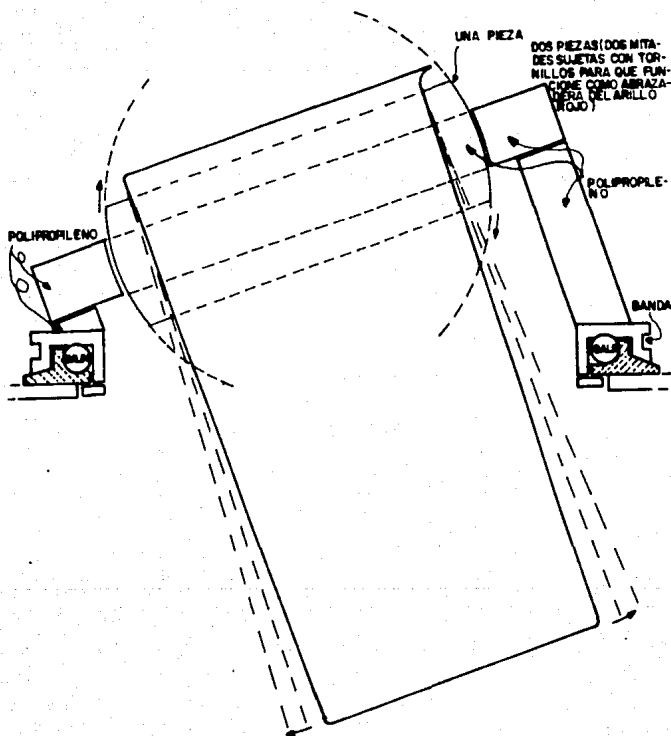


Fig.4.- Vaso giratorio con inclinación regulable.

MUESTRA	ACIDO NITRICO (%)	ACIDO ACETICO (%)	ACIDO FLUORHI. (%)	TIEM. DE ATAQUE (min.)	SILICIO* ATACADO (µm)	VELO. DE ATAQUE (µm/min.)	LATERAL/ TRANSV. (-)	COMENTARIOS (-)
H34'	70	12	18	20	150	7.5	.65	SILICIO POCO IRREGULAR, METAL ACEPTABLE.
H35'	73	11.5	18.4	20	104	5.2	.71	SILICIO MANCHADO Y POCO PULIDO, METAL ACEPTABLE.
H36'	74	12	14	18	78	4.33	.88	SILICIO BIEN, METAL BIEN.
H37'	69.2	17.4	17.4	18	154	8.55	.84	SILICIO BIEN, METAL ACEPTABLE.
H39''	60.9	21.4	17.4	10	13.2	13.2	.63	MUESTRA EXCELENTE.
H40''	57.7	23	19.2	10	123	12.3	.91	MUESTRA EXCELENTE.
H41''	59.4	23	17.3	10	91	9.1	.64	MUESTRA EXCELENTE.
H42'	61.5	23	18.4	20	168	8.4	.59	MUESTRA BUENA, ORILLA DEL SILICIO POCO IRREGULAR.
H42A	62.5	23	14.4	17	135	7.94	.55	MUESTRA CABI EXCELENTE, MANCHADO EL SILICIO.
H43'	62.7	23.5	13.7	20	142	7.1	.66	METAL POCO MALTRADO, MUESTRA BIEN.
H45''	59	20	21	10	143	14.3	1.15	BUEN ESTADO, METAL BIEN ORILLAS IRREGULARES.
H46''	60	20	20	10	168	16.8	.88	METAL DAÑADO, SILICIO BIEN, ORILLAS IRREGULARES.
H47'	61	20	19	10	80	8	1.11	SILICIO BIEN, METAL LIBERAMENTE DAÑADO.
H48'	62	20	18	12	92	7.66	.46	SILICIO BIEN, METAL EXCELENTE.
H50''	64	20	16	15	107	7.13	1.49	SILICIO BIEN, ORILLAS MUY MALAS, METAL POCO MALTRADO.

\* : SILICIO ATACADO POR CARA.

TABLA 1.- ALGUNOS RESULTADOS DE SILICIO ATACADO POR LAS DOS CARAS.

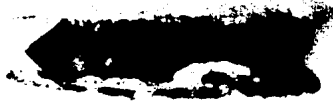


La figura (5) muestra tres ejemplos de ataques químicos por las dos superficies (dispositivos a granel). En estas fotografías lo que es importante observar con claridad es la superficie lateral, la cual logra observarse bien únicamente por un lado, estando este lado de la parte izquierda de las fotografías. La figura (5a) muestra a un dispositivo con un ataque lateral muy grande. Es claro que la metalización que queda "volando" es muy frágil por lo cual tiende a reducirse con mucha facilidad dando la impresión de tener un ataque lateral pequeño. La fotografía (5b) muestra un dispositivo con un ataque lateral pequeño. En esta muestra la metalización lateral ya ha sido parcialmente maltratada. En el caso de la última muestra (fig.5c) el área de la metalización es menor al área del silicio por lo cual estas muestras se observan con una orilla muy brillante, debido a que el terminado del silicio es de un negro muy brillante.

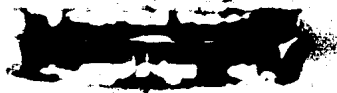
Debido a que cuando la separación química de dispositivos se hace por las dos caras, el tiempo se reduce por un factor de dos con respecto al caso en que se atacan las muestras químicamente sólo por una cara, se tuvieron muchos casos en este tipo de separación en los cuales el aspecto de la metalización es excelente.

Con este tipo de separación química se permite introducir a un proceso completamente novedoso, el cual pareciera que no es realizable, pero que hecho de esta manera, presenta algunos inconvenientes por el hecho de tener dispositivos a granel lo cual implica lo siguiente:

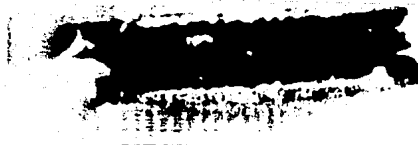
- i) Encapsulamiento lento (dispositivo por dispositivo).
- ii) También dispositivos sin pasivar, proceso que tiene que hacerse uno por uno.
- iii) Disminución de la eficiencia por este manejo mecánico de los dispositivos.



a) Muestra con un ataque lateral grande.



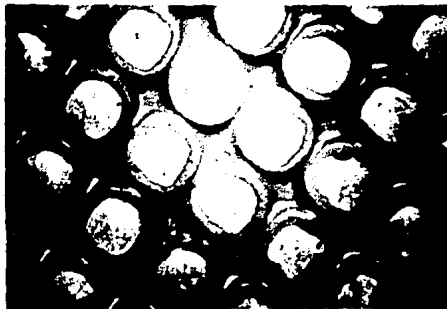
b) Muestra con ataque lateral pequeño.



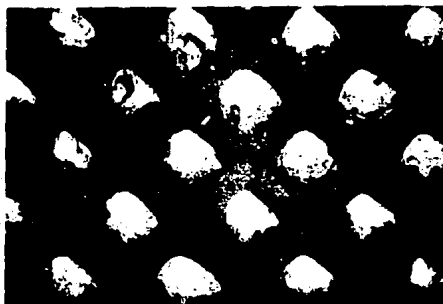
c) Silicio de mayor área que la metalización.

Fig. 5.- Separación de dispositivos mediante ataque químico por las dos superficies de la oblea (dispositivos a granel).

Lo que convendría es tener a los dispositivos acomodados y pasivados (versión yugoeslava) mediante un hule de silicio lo cual haría al proceso de encapsulamiento bastante más eficiente.



a) "Cara superior" con una "dona" de hule alrededor de la metalización.



b) "Cara inferior".

Fig. 6.- Fotografía de rectificadores 1N4000 en versión yugoeslava. La parte clara y abultada corresponde a la metalización y la oscura al hule rojo de silicio ( un silicón).

**6.- SEPARACION QUIMICA DE DISPOSITIVOS POR UNA CARA :  
DISPOSITIVOS FIJOS.**

Una manera de tener dispositivos acomodados y pasivados sería procesándolos de la manera siguiente:

- i) Ya estando metalizados colocarles una película rígida que los conserve fijos después del ataque químico del silicio.
- ii) Después de haber sido separados químicamente, colocar el hule de silicio en los canales mediante una espátula ó incluso con una jeringa.
- iii) Después de haber curado perfectamente este hule, eliminar esta película de cera la cual permitió mantenerlos acomodados.

El ataque químico se realizó de la manera siguiente:

- 1) Temperatura constante:  $T=30^{\circ}\text{C}$ .

Se probaron temperaturas más bajas, de manera exploratoria lo cual se abandonó por las dos razones siguientes: a) para tener velocidad de ataque suficientemente alta, debía de tenerse un alto contenido de ácido fluorhídrico (sustancia muy cara), b) la textura del silicio con mucha frecuencia resultaba muy irregular.

- 2) Revoluciones por minuto fijas.

Este parámetro se estuvo variando también inicialmente, pero por arriba de 50 rpm, los resultados en cuanto a formas y texturas del silicio lateral son prácticamente los mismos, por lo cual se decidió mantener fijo este parámetro.

### 3) Muestras pequeñas.

Por efectos de economía, todo el trabajo se hizo con muestras muy pequeñas lo cual facilita el proceso al reducirse sensiblemente problemas como los siguientes:

- i) Control más sencillo de la temperatura.
- ii) Que la velocidad de ataque sea reproducible al no agotarse ó degradarse sensiblemente la solución.

Después de este estudio con muestras pequeñas, se realizó uno breve con muestras grandes, surgiendo nuevos problemas los cuales se resolvieron satisfactoriamente (ver parte 6-3).

### 4) Soluciones de ataque.

La composición de las soluciones de ataque se varió en un rango amplio, comenzándose en la región de alto contenido de ácido nítrico ( $\approx 65\%$ ) y bajos contenidos de ácido fluorhídrico ( $\approx 15\%$ ) y ácido acético bajo ( $\approx 20\%$ ). Lo anterior se debe al hecho de que en esta región el ataque químico del silicio es poco selectivo.

5) Muestra suelta. La muestra se colocó horizontalmente en el fondo del vaso con la cara cubierta hacia abajo. El vaso se mantiene girando en posición vertical.

## 6-1) DE ORIENTACION (111).

Para caracterizar bien a esta separación química, se procedió a realizar una serie de ataques observando diversos aspectos de estos procesos, tanto cuantitativos como cualitativos. Los parámetros cuantitativos que se tomaron en cuenta fueron los

siguientes:

- 1) Velocidad de ataque químico del silicio.
- 2) Relación de velocidades de ataque lateral a ataque vertical ó de profundidad.
- 3) Tiempo de ataque.

La revisión cualitativa que se hizo fue con respecto al aspecto (textura, forma, irregularidades) tanto del silicio como del metal. La parte cuantitativa es fácil y segura de manejar. La parte cualitativa en este ataque también es sumamente importante pero más difícil de reportar.

En cuanto al aspecto del silicio, se decidió reportarlo tanto en textura e irregularidades así como en la forma del silicio. Las dos clasificaciones son las siguientes:

#### A) TEXTURA E IRREGULARIDADES DEL SILICIO.

Se decidió agrupar a las muestras en cuatro tipos:

- i) \* Muestras malas.

Son las muestras cuyas paredes laterales de silicio carecen de un terminado a espejo. Las paredes están picadas.

- ii) ● Muestras regulares.

Estas muestras tienen un terminado a espejo, pero con ondulaciones en toda la pared lateral del silicio.

iii) ▲ Muestras buenas.

Estas muestras presentan ondulaciones sólo en la parte superior e inferior de las paredes laterales del silicio. El terminado es también a espejo.

iv) ■ Muestras muy bien.

Son las muestras que no presentan ningún tipo de ondulación y con paredes de terminado a espejo.

El terminado a espejo en muestras observadas horizontalmente en microscopios estereoscópicos aparecen muy brillantes y completamente oscuras. La fig. (7) muestra un ejemplo de estos cuatro tipos de muestras.

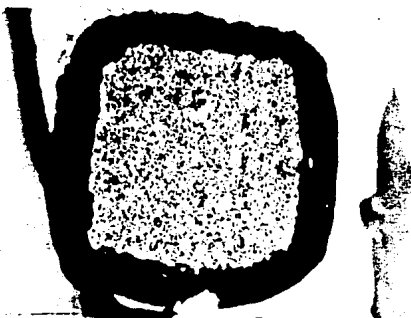


Fig. 7.- Fotografía de una muestra buena, la cual presenta únicamente ondulaciones en la parte superior. La parte blanca rugosa corresponde a la superficie original de la oblea de silicio del tipo de "sand-blasting".

## B) FORMA DEL SILICIO.

Resulta también sumamente importante las formas de las paredes laterales ó tipos de pendientes que se obtuvieron. Todas las formas también se pueden agrupar en cuatro tipos los cuales son los siguientes:



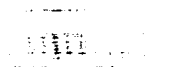
i) I: de paredes verticales.



ii) II: de paredes mixtas.



iii) III: de paredes curvas.



iv) IV: de paredes rectas.



La figura (8) muestra tres ataques químicos desde el punto de vista de ataque lateral del silicio, uno de los criterios más importantes para definir la calidad de estos ataques químicos. La parte oscura lateral corresponde al silicio lateral (paredes) las cuales normalmente presentan un terminado muy brillante (tipo espejo) de color completamente negro en un microscopio estereoscópico. La parte superior blanca y rugosa corresponde a la de la superficie original de la oblea de silicio del tipo de "sand-blasting" (arenadas). Para mayor claridad, la metalización superior se arrancó mecánicamente con el auxilio de pinzas. En muchas ocasiones, el silicio se despedaza debido a una gran adherencia metalización - silicio. A pesar de los esfuerzos a que el rectificador es sometido para desprender la metalización, estos dispositivos no se desprenden de la mezcla de cera - goma. De estas tres fotografías (fig. 5) pueden observarse ataques químicos con ataques laterales desde muy altos hasta muy bajos. En la fig. (5c) se observa una muestra que desde el punto de vista de ataque lateral ya fue separada químicamente con una buena calidad. Las clasificaciones se muestran en la fig. (9) en un diagrama tridimensional (% de ácido acético, % de ácido fluorhídrico, % de ácido nítrico) para poder de manera sistemática, determinar cuales son las mejores áreas de trabajo.

En cuanto al terminado del metal, los resultados también se agruparon en cuatro grupos, los cuales son los siguientes:

i) \* Muestras malas.

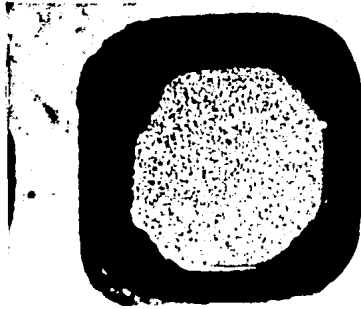
Metal que presenta picaduras, de aspecto muy mate así como de color obscuro.

ii) ● Muestras regulares.

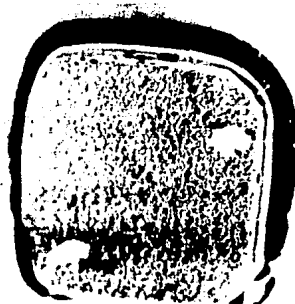
Metal con adelgazamiento en las orillas y de color obscuro, sin picaduras importantes.



a) Ataque químico lateral muy alto.

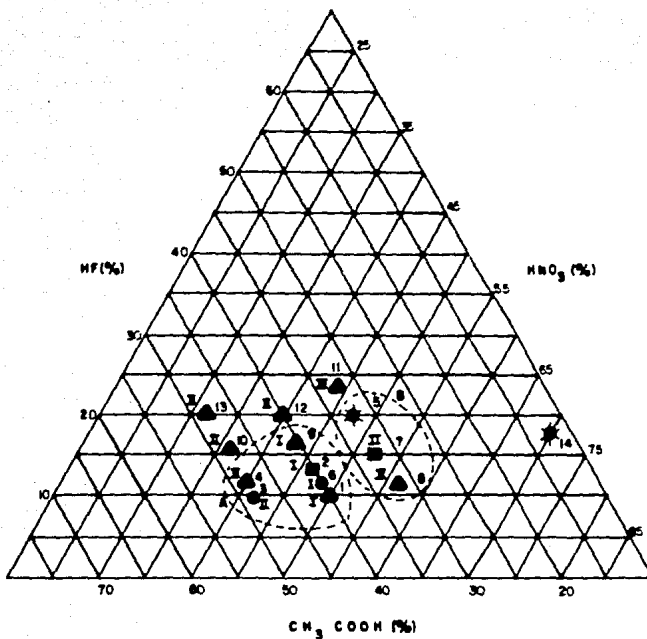


b) Ataque químico lateral medio.



c) Ataque químico lateral bajo.

Fig. 8.- Tres ejemplos de rectificadores 1N4000 separados químicamente.



★ Male      ● Regular      ▲ Blen      ■ Muy Bien

I		II		/ Val. (-) v (μm/min)		/ Val. (-) v (μm/min)	
		1	0.15	7.5	8	0.74	8.5
		2	0.19	22.1	9	0.91	19.7
		3	0.37	11.6	10	1.02	15.4
		4	0.49	13.2	11	1.20	54.7
III	IV	5	0.57	21.1	12	1.31	21.0
		6	0.69	10.7	13	1.34	12.6
		7	0.73	18.6	14	>>1	10.3

Fig. 9.- Resultados del ataque al silicio lateral en orientación (111).

**iii) ▲ Muestras en buen estado.**

Son muestras que presentan un adelgazamiento despreciable y un color gris mate.

**iv) ■ Muestras de muy buen terminado.**

Son muestras sin ataques visibles y de un aspecto metálico. La fig. (10) muestra los resultados en cuanto a la metalización de las mismas muestras.

De un análisis de estos diagramas se pueden obtener las observaciones siguientes:

**1) Paredes perpendiculares del silicio (fig. 9).**

Se presenta en un grupo de muestras atacadas en soluciones con un alto porcentaje de ácido acético: alrededor del 40 %.

**2) Velocidades de ataque lateral baja (fig. 9).**

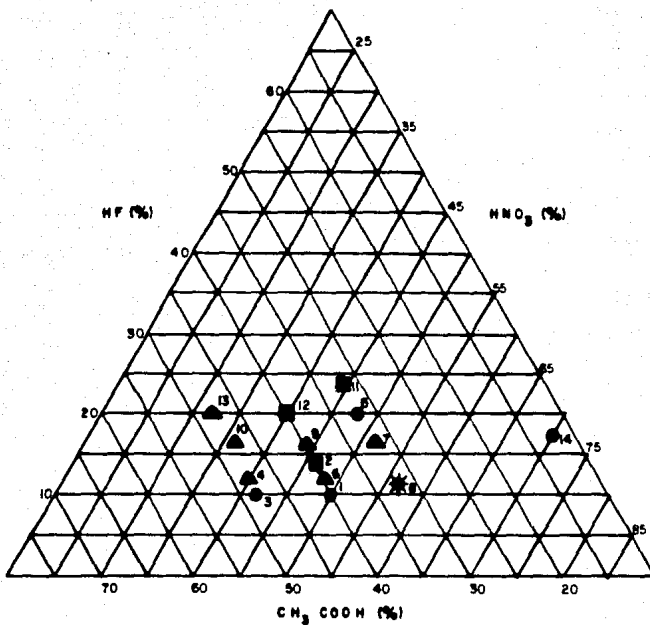
Se definen dos áreas, la A y la B donde la mayoría de las muestras presentan ataques laterales bajos.

**3) Terminado del silicio (fig. 9).**

De manera irregular se tienen los terminados del silicio. Una de las razones era la falta de control en el estafiado ya que sólo se hizo un trabajo rápido (exploratorio). Este trabajo se revisará con cuidado más adelante.

**4) Terminado del metal (fig. 10).**

Lo importante es notar que tenemos muestras con terminados de todas calidades y que algunos de muy buen terminado metálico, también presentan un ataque lateral pequeño. Falta todavía un trabajo más exhaustivo, con mayor control de todos los procesos para tener resultados más definitivos.



\* Meta      ● Regular      ▲ Bien      ■ Muy Bien

Fig. 10.- Resultados del terminando del metal en orientación (111).

Sin embargo, ya se tienen resultados iniciales excelentes debido a los aspectos siguientes:

- 1) Ataque lateral bajo.
- 2) Silicio lateral de muy buen terminado.
- 3) Muy buen aspecto de la metalización.

Con lo cual se está en posibilidades de comenzar a fabricar dispositivos 1N4000 con una presentación aceptable.

Un problema que se presentó inicialmente fue un ataque excesivo del metal. Para resolver este problema:

- 1) Se variaron las composiciones de las preparaciones.
- 2) Se usaron botellas nuevas de ácido, sin resultados positivos.

Posteriormente, se pensó que una posible causa podía ser la falta de homogenización de la solución. Aún cuando esta solución está girando continuamente para ajustar la temperatura de ataque de la solución, se pensó que esta "agitación" podía ser insuficiente y se procedió a colocar la solución previamente en el ultrasonido durante cinco minutos. Con esta precaución, el ataque excesivo del metal desapareció inmediatamente.

En efecto, si la aleación de Sn-Pb se coloca en ácido nítrico por ejemplo, se ataca con bastante rapidez. Sin embargo, en una mezcla de ácido nítrico, ácido fluorhídrico y ácido acético el metal en muchos casos aún con inmersiones largas, no presenta ataques visibles, aún cuando cambia su terminado (tiende a ser más mate). Lo anterior puede explicarse si uno supone que en esta solución se forma un óxido inerte e impermeable muy rápidamente lo cual evita la acción química posterior de esta preparación en la

aleación de plomo-estaño.

Se usó una aleación con un alto contenido en plomo lo cual también contribuye a que esta aleación no se ataque ó se ataque lentamente en estas soluciones atacantes de silicio. Si se usara por ejemplo la composición eutéctica, este tratamiento químico no sería posible ya que esta aleación sí se ataca rápidamente. Además, debido a que esta aleación tiene una temperatura de fusión más alta, presenta ventajas en cuanto a la confiabilidad de los dispositivos.

#### 6-2) DE ORIENTACION (100).

Con la intención de mejorar el terminado de los rectificadores 1N4000 que se obtuvo con la separación química en obleas de orientación (111), se procedió a hacer un estudio rápido con obleas de orientación (100). Lo anterior fue debido al hecho de que habitualmente en soluciones químicas el silicio de orientación (100) se ataca más rápidamente que el silicio de orientación (111). Si se pudiera tener separaciones químicas más rápidas y más preferenciales, se tendría un ataque lateral más pequeño y un mejor aspecto de la aleación de estaño-plomo lo cual significa una mejor calidad de este proceso químico.

La fig. (11) muestra los resultados en obleas de orientación (100) en cuanto al silicio. Comparando los resultados en ambas orientaciones, las observaciones serían las siguientes:

- 1) Se tienen velocidades de ataque similares.
- 2) El ataque lateral es también parecido.
- 3) El terminado del metal es mejor en orientación (111).
- 4) En cuanto a formas, la de paredes verticales sólo se obtuvo en orientación (111) y la recta inclinada (forma IV) se obtuvo únicamente en las muestras de orientación (100).

La fig. (12) muestra a su vez los resultados en el terminado del metal en estas muestras de orientación (100). En general, los resultados son bastante más pobres con estas muestras con respecto a las de orientación (111).

Como conclusión de estos dos tipos de muestras, se observa un mejor terminado en las de orientación (111) que en las de orientación (100).

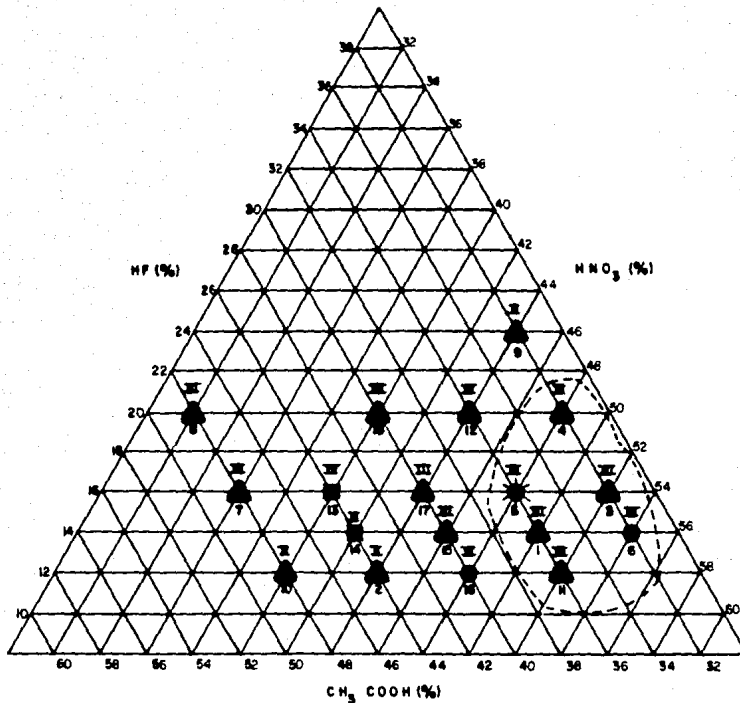
### 6-3) MUESTRAS GRANDES.

Todo el trabajo reportado en los incisos (6-1) y (6-2) por cuestiones de economía se hizo en muestras pequeñas. Una vez terminado este estudio, para trabajar en la colocación del hule rojo, se requiere de muestras grandes, por lo cual se procedió a separar químicamente los dispositivos en obleas completas de 1.5 pulg. en condiciones similares a lo hecho en los dos incisos previos con los resultados siguientes:

- 1) Ataque lateral muy grande.
- 2) Daño del metal importante.
- 3) Pendientes del silicio lateral de diversas formas en un mismo dado, etc.

Para tratar de reducir estos problemas se comenzó a aumentar el volumen de la solución atacante sin mejoras significativas. El diámetro del vaso contenedor es de 60 mm y el de la oblea de 38 mm, girando a alrededor de 40 rpm. El resultado de que la velocidad de ataque se haya reducido, se relacionó con un "agotamiento" de la solución y como solución se pensó en introducir un "agitador" en forma de hélice el cual se construyó de polipropileno, para poder tener una renovación eficiente de la solución.





☆: Mala      ●: Regular      ▲: Bien      ■: Muy Bien



I

II

	Va.l. (-)	v (A/m/min)	Va.l. (-)	v (A/m/min)
1	0.36	16.6 74	10	0.72
2	0.47	7.8 77	11	0.72
3	0.52	17.6 72	12	0.75
4	0.53	22.3 17	13	0.78
5	0.61	16.5 36	14	0.82
6	0.62	11.7 71	15	0.83
7	0.64	13.2 21	16	1.00
8	0.71	18.0 22	17	1
9	0.71	16.1 18	18	1



III

IV

Fig. 11.- Resultados del ataque al silicio en orientación (100).

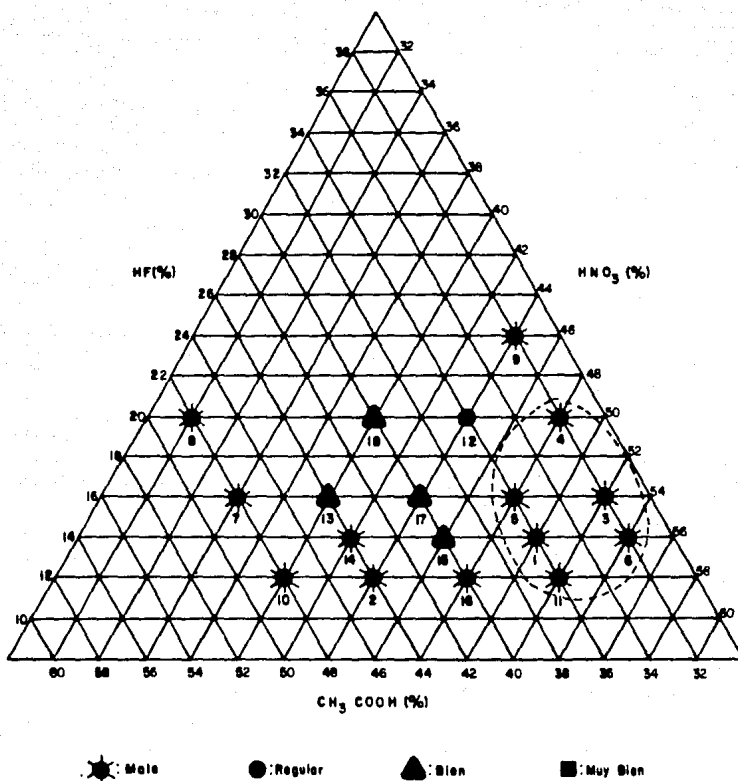


Fig. 12.- Resultados del terminado del metal en orientación (100).

Con esta precaución adicional para obleas completas y aún usando el vaso pequeño ( Fig. 3), se recobraron los resultados obtenidos en muestras pequeñas, es decir:

- i) Daño al metal no visible.
- ii) Ataque lateral bajo.
- iii) Velocidades de ataque de 10 a 20  $\mu\text{m}/\text{min}$ .
- iv) Formas del silicio lateral (I, II, III ó IV).
- v) Silicio lateral con terminado a espejo.

#### 7.-CONCLUSIONES.

Aún cuando este estudio está incompleto, aún en la parte de la separación química, se obtuvieron muchos resultados importantes como los siguientes:

- 1) Es posible la separación química de estos dispositivos, usando como material de enmascaramiento (ó definición) a la aleación de estaño-plomo.
- 2) La separación química se pudo hacer con una calidad aceptable. Los parámetros de esta calidad son los siguientes:
  - a) Sin daño visible del metal.
  - b) Con ataque lateral bajo.
  - c) Velocidades de ataque del silicio de 10 a 20  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

El trabajo pendiente el cual se comenzará de inmediato basándose en un estudiante de licenciatura es el siguiente:

- i) Separación química de dispositivos con varios tipos de aleaciones de plomo-estaño.

Se ha observado que en estas soluciones, la aleación eutéctica de estos dos metales se daña muy rápidamente. Sería interesante saber la respuesta química de diversas aleaciones a estas soluciones.

ii) Separación química de dispositivos con silicio de espesor corregido.

Este estudio se hizo en silicio con espesores comprendidos entre 250  $\mu\text{m}$  y 300  $\mu\text{m}$ , lo más usual siendo alrededor de 275  $\mu\text{m}$ . El espesor usual del silicio para rectificadores 1N4000 está entre 200 y 220  $\mu\text{m}$  lo cual deberá dar mejores resultados al tener tiempos de ataque más cortos.

iii) Alternativas.

Otra manera interesante en la que se tendría una separación mixta (mecánica y química) podría ser de la manera siguiente:

- Pegar la oblea a un hule transparente con un adhesivo ó pegamento, como se acostumbra cuando se separan los dispositivos mecánicamente al momento de encapsularlos.

- Rayar entre el 50 y el 70 % del espesor del silicio.

- Terminar de separarlos químicamente.

Si este procedimiento se pudiera realizar con un buen control, se podría estirar después a este hule para tener a los dispositivos a una separación conveniente. Esta forma de separar a los dispositivos químicamente daría una flexibilidad necesaria para un encapsulamiento confiable, rápido y económico.

iv) Estudio más completo.

Trabajando únicamente en muestras de silicio de orientación (111), sería necesario hacer un estudio más completo y cuidadoso para observar bien tendencias en cuanto a terminados del metal y del silicio después de la separación química. Lo anterior se basaría en una metalización realizada con un buen control, sobre todo en la aleación de estaño-plomo. También tendría que hacerse un trabajo de ataques químicos amplio en muestras ya difundidas (estructuras pin).

## C A P I T U L O V

### RESULTADOS: TECNOLOGIA DISPONIBLE Y MEDICIONES ELECTRICAS.

En este capítulo se describen las dos partes siguientes:

1) Descripción de la tecnología actualmente disponible, la cual ya muestra un grado de avance importante, aún cuando falta todavía revisar con cuidado diversos procesos.

2) Resultados de diversas mediciones eléctricas las cuales servirán para mostrar el grado de avance de esta tecnología.

#### 1.- DESCRIPCION DE LA TECNOLOGIA DISPONIBLE.

Se parte de una oblea de silicio de un diámetro de 1.5 pulg ( 6 2 pulg ) a la cual se le efectúan dos difusiones para obtener una estructura pin. A estas obleas se les texturiza sus superficies con un abrasivo fino a base de alúmina, mediante un proceso de "sand-blasting" (polvo a presión). La figura (1) muestra un terminado típico de las superficies de estas obleas de silicio. El proceso siguiente es el de metalización el cual consiste de varios pasos los cuales son los siguientes:

- 1) Depósito de paladio.
- 2) Depósito de níquel.
- 3) Grabado del níquel.

La figura (2) muestra una fotografía a este nivel con los motivos de níquel ya bien definidos, estando estos motivos grabados por las dos caras de la oblea de silicio y a su vez, perfectamente

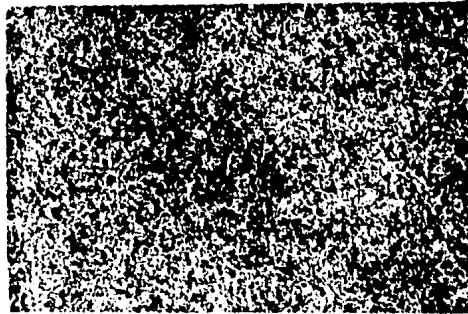


Fig. 1.- Fotografía de la superficie de un dispositivo de potencia.

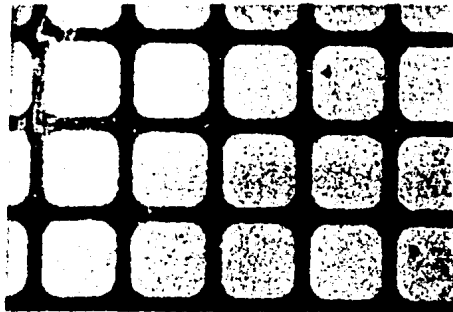


Fig. 2.- Fotografía del grabado del níquel.

bien alineados. Después del grabado del níquel se procede a introducir la oblea en una aleación de plomo-estaño, fundida para el "estañado".

Con esta etapa se termina el proceso de metalización y el aspecto que toman las obleas se muestra en la fig. (3).



Fig. 3.- Estañado de la oblea de silicio.

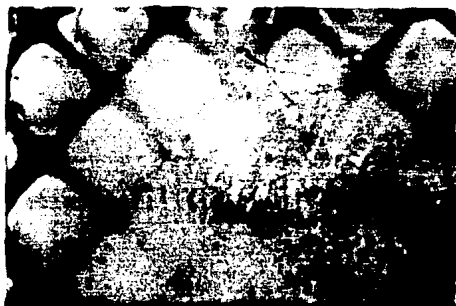


Fig. 4.- Fotografía de una oblea de silicio (una parte) con una película de cera-goma.



Se puede observar un menisco convexo de soldadura de estaño-plomo que se forma en este proceso. En la figura (4) se muestra el aspecto que toman los dispositivos después de colocarles una capa de cera-goma translúcida la cual sirve para mantener fijos y en la misma posición a los dispositivos temporalmente, del ataque químico del silicio no metalizado ó descubierto a la colocación del hule rojo de silicio.

Después de colocar la capa de cera-goma se procede a la separación química en una solución de ácido nítrico-ácido fluorhídrico-ácido acético. La figura (5) muestra a estos

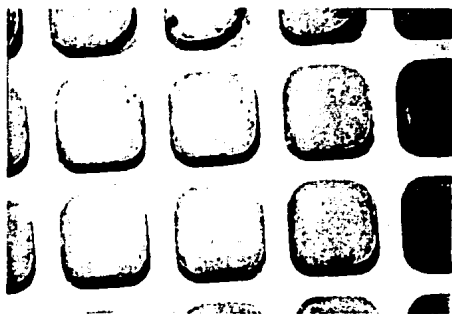


Fig. 5.- Fotografía de dispositivos separados, fijos en una capa de cera-goma.

dispositivos separados ya químicamente, teniendo como fondo blanco a la capa de cera-goma. Inmediatamente después de esta separación química se procede a colocar el hule rojo de silicio el cual sirve para pasivarlos y para mantenerlos acomodados y fijos lo cual puede observarse en la figura (6). Una vez que el hule rojo de silicio ha curado (de 24 a 48 horas), se procede a eliminar la capa de cera-goma quedando ahora los dispositivos inmersos en este hule. La mayor parte del hule rojo de silicio se coloca en el espacio liberado (ranuras) por el silicio intermedio atacado, sin embargo, la metalización resulta también recubierta con una

película delgada semitransparente de este hule rojo, material que debe eliminarse completamente. La eliminación de este hule se puede hacer con la ayuda de una lija fina para agua. La figura (7)



Fig. 6.- Rectificadores con hule rojo de silicio ya colocado.

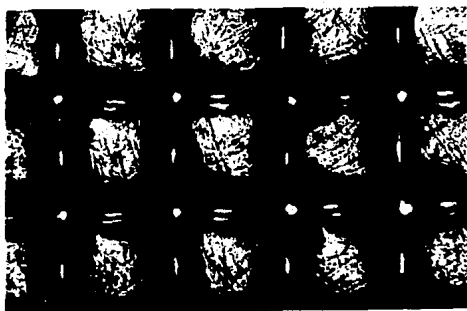


Fig. 7.- Dispositivos con el hule rojo eliminado de la soldadura de plomo-estaño.

muestra dispositivos después de la eliminación del hule que quedó colocado sobre la soldadura de plomo-estaño. Con esta eliminación de hule, se termina el procesamiento de los dispositivos a nivel de oblea. El grupo de procesos que continuará sería ahora los referentes al encapsulamiento comenzando por formarse el esqueleto integrado de la manera siguiente: terminal + cristal + terminal. Estos procesos no serán abordados en el presente estudio. En las siete figuras (fotografías) se han mostrado los resultados que se tienen en las principales etapas de fabricación de estos dispositivos sin mencionar aspectos acerca del dominio de estos procesos.

Ahora se procederá a mencionar algunos resultados con respecto al control que se ha logrado en la separación química de los dispositivos, uno de los procesos más estudiados en el presente trabajo. La figura (8) muestra un dispositivo con un ataque lateral bajo y la figura (9) uno con un ataque lateral grande. A ambos dispositivos se les desprendió (arrancó) la metalización para observarlos. Lo que se desea es tener dispositivos con un ataque lateral bajo (pero no mucho) lo



Fig. 8.- Fotografía de un rectificador con un ataque lateral bajo.

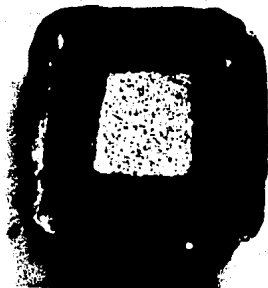


Fig. 9.-Fotografía de un rectificador con un ataque lateral muy alto.

cual permite un ángulo de biselado que conserve la tensión de ruptura alta, pero que no sea tan alto que ocasione un aprovechamiento pobre del silicio al tener que aumentar considerablemente la superficie de los dispositivos para compensar esta reducción. Es el aprovechamiento del silicio el efecto más importante al cual se vigilará con cuidado en la separación química.

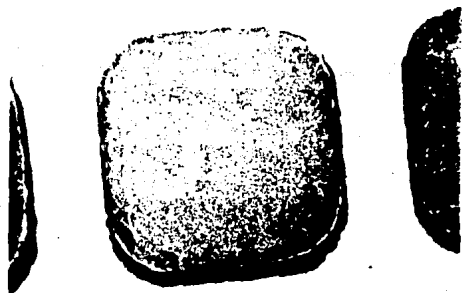


Fig. 10.- Metalización conservando su calidad después de la separación química.



**Fig. 11.- Fotografía de un dispositivo con una metalización de calidad pobre después de la separación química.**

En cuanto a la calidad del metal después del ataque químico se muestra en la figura (10) una fotografía de un dispositivo bien terminado y en la figura (11) un dispositivo de una metalización con una calidad pobre. Observando estas dos figuras queda claro que los dispositivos se pueden separar químicamente y la metalización servir bien como material de enmascaramiento.

Las figuras (12 a y 12 b) muestran dos tipos de superficies laterales de las cuatro que se obtuvieron. Con este breve resumen de la tecnología de los 1N4000 se puede entender que está avanzada aún cuando falta todavía revisar con cuidado diversas etapas.



Fig. 12 a) Parte inferior: inclinada. Parte superior: casi vertical.



Fig. 12 b) Superficie muy inclinada.

## 2.- RESULTADOS DIVERSOS: MEDICIONES ELECTRICAS.

Debido a que estos dispositivos en polarización:

inversa presentan tensiones de ruptura muy altas (en algunos casos de más de 2000 volts), es fácil dañarlos cuando se les mide a nivel de oblea. Para disminuir esta destrucción a un mínimo aceptable, se hizo lo siguiente:

- 1) Un montaje especial (ver figura 13) que nos permitirá aplicar con seguridad "altas corrientes" y "altas tensiones".
  
- 2) Mantener la potencia aplicada máxima a un valor pequeño sobre todo en polarización inversa.

## 2-1) POLARIZACION INVERSA.

En la primera muestra medida no se observó en un inicio la segunda condición y varios dispositivos fueron destruidos. A pesar de algunas desventajas con respecto a rectificadores encapsulados, el medirlos a nivel de oblea resulta más económico, rápido y permite hacer algunos "mapeos" de estas tensiones de ruptura. Normalmente no se puede medir la verdadera tensión de ruptura ( $dI/dV$  muy grande) ya que se presenta a varios  $\mu A$ , corriente que si se aplicara destruiría al dispositivo.

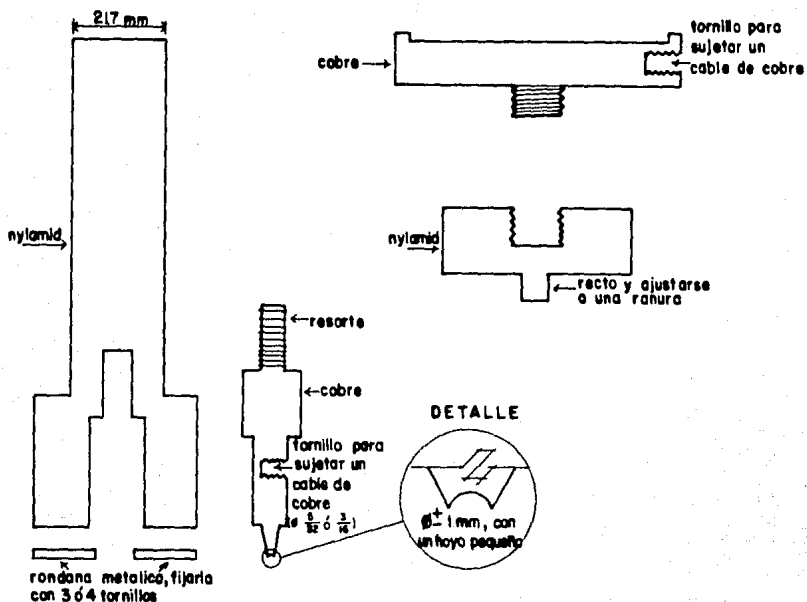


Fig. 13.- Equipo para medir la tensión de ruptura.

Se reporta una tensión a una corriente lo cual representa aproximadamente bien a la tensión de ruptura.

A continuación se presentan algunos resultados exploratorios que seguramente deben de mejorar al perfeccionar la pasivación con el hule de silicio, proceso aún pendiente de optimizar. En las figuras (14), (15) y (16) se presentan tres mapas de tensión de ruptura. Donde se indica a que corriente de fuga se midió esta tensión y la potencia que se les aplico.





											1600	1600	VOLTS				
											0	18	μA				
1000	1400	1600	1600	1400	D	1600	1700	1600									
.2	.8	0	0	16		1.8	.4	.2									
1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600									
0	0	0	.2	2	.2	.4	.4	4									
1600	1600	1600	1000	D	700	1600	1600	1600	1200								
0	0	0	0		16	0	0	.4	0								
1800	1600	1600	1600	200	D	600	1600	1600	1600	1100							
0	0	0	0	0		16	0	.4	0	0							
	1600	1200	1500	1800	600	100	1300	1500	1600	1600							
	0	16	0	0	16	16	16	0	0	0							
				500	1600	1600	1600	1600	800	1600	1600						
				0	.4	.4	.4	0	16	0	0						
					1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	150					
					0	0	0	0	0	.4	18						

Fig. 15.- Tensión de ruptura de una muestra pequeña , potencia aplicada de 2.3 watts. (muestra 2).

											1600	1600	VOLTS				
											.4	.2	μA				
1600	1600	1600	1600	1600	800												
.4	.2	0	0	0	0												
400	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600									
.4	0	0	0	0	0	.4	.4	0									
1000	1200	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600									
0	0	0	0	0	0	0	.4	0									
1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600										
0	3	2	0	3	.4	0											
1600	1400	D	1600	1600	1600	1600											
0	0		0	0	0	4											
1400	1600	D	1600	1600	1600	1600											
0	.4		2	0	2	0											
	1400	1600															
	0	.4															
	1400	D															
	0																

Fig. 16.- Tensión de ruptura de una muestra pequeña, potencia aplicada de 2.3 W, (muestra 3).

Las figuras (17), (18) y (19) muestran las tensiones de ruptura en forma de histogramas observándose una buena distribución de las tensiones de ruptura en las dos últimas muestras. Lo que se desearía es que todos los dispositivos rebasaran los 1000 volts para disponer únicamente de los dispositivos más caros.

Otra forma de mostrar estos mismos resultados se presenta en la figura (20) en donde se grafica el porcentaje de los rectificadores que igualan ó rebasan una cierta tensión de ruptura. En la distribución de la muestra 3, alrededor del 95% de los rectificadores rebasan los 1000 volts (muestra de 78 dispositivos) lo cual es un buen resultado, a pesar de ser una muestra todavía exploratoria con algunos de los últimos procesos por revisar con cuidado.

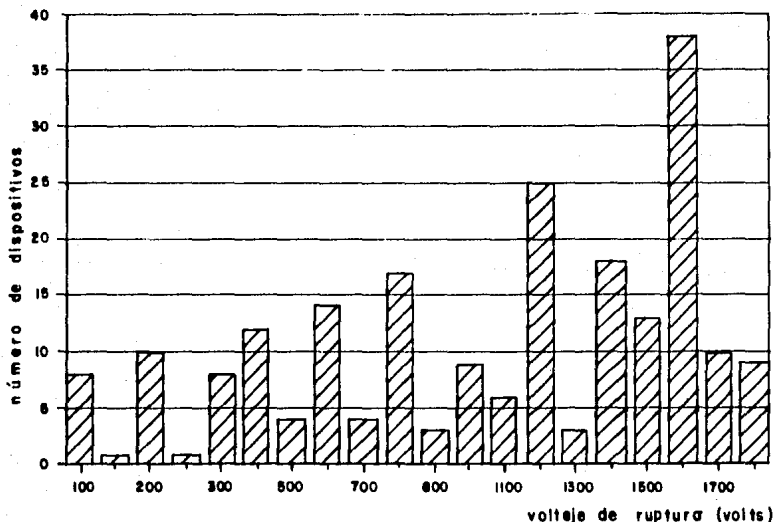


Fig. 17.- Agrupamiento de dispositivos en función de la tensión de ruptura (muestra 1).

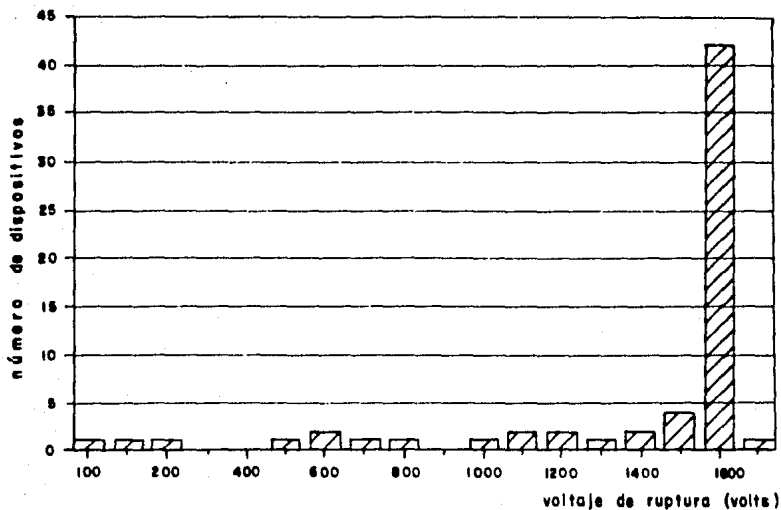


Fig. 18.- Agrupamiento de dispositivos en función de la tensión de ruptura ( muestra 2 ).

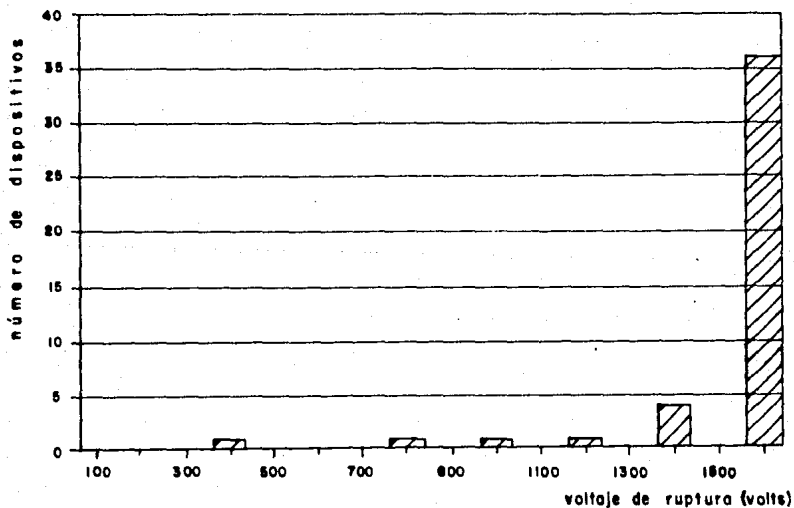


Fig. 19.- Agrupamiento de dispositivos en función de la tensión de ruptura ( muestra 3 ).

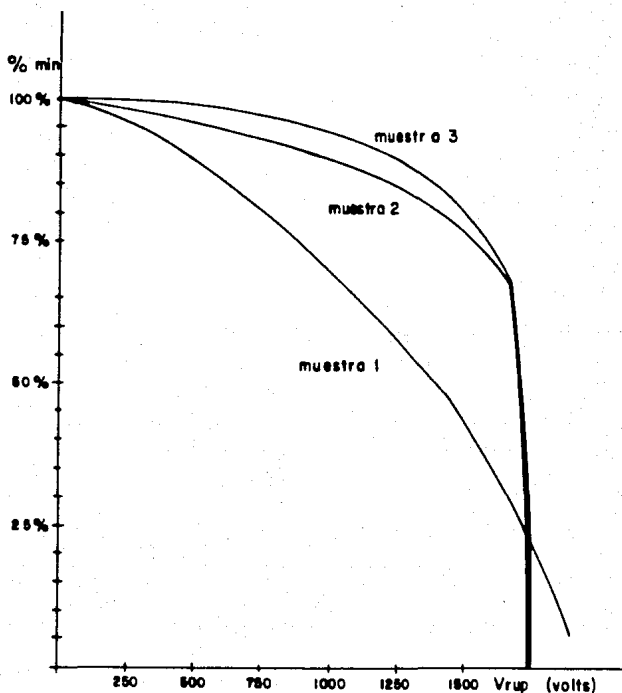


Fig. 20.- Porcentaje de dispositivos que rebasan una cierta tensión de ruptura.

## 2-2) POLARIZACION DIRECTA.

Las figuras (21) y (22) muestran las distribuciones de las caídas de tensión en el dispositivo ( $V_F$ ) en polarización directa a la corriente de operación ( $I_{op} = 1$  ampere) y la potencia aplicada de 0.6 watts.

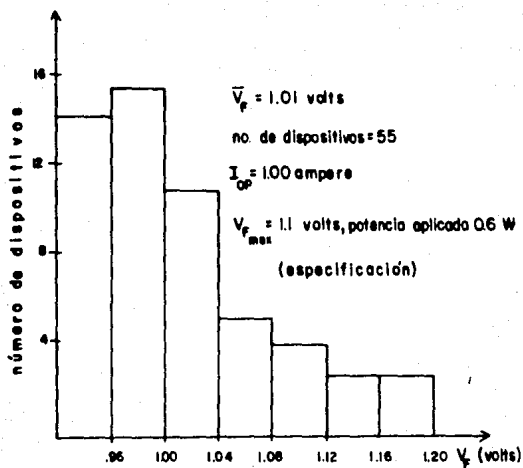


Fig. 21.- Histograma de rectificadores de la muestra 2.

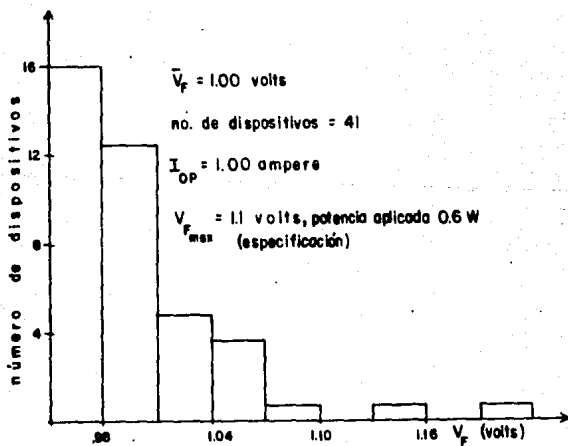


Fig. 22.- Histograma de rectificadores de la muestra 3.

En cuanto a polarización directa se tiene un porcentaje importante de dispositivos que no cumplen especificaciones (14% muestra 2, 5% muestra 3) lo cual puede evitarse mejorando la tecnología y/o aumentando el área de los dispositivos. Se continuará trabajando en estos rectificadores para mejorar estas distribuciones de tal forma que por polarización directa se tenga un rechazo muy pequeño. Otra posible razón de esta alta tensión observada en polarización directa es que se midieron a nivel de oblea.

### 3.- CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan resultados de la tecnología actualmente disponible en polarización inversa y polarización directa de dispositivos a nivel oblea de tipo industrial. Estos resultados iniciales son más prometedores en polarización inversa que en polarización directa.

Es claro que aún falta mejorar sensiblemente las últimas etapas así como revisar con cuidado el aspecto de costos (mercado y otras) para una posible producción piloto industrial. También será necesario conseguir mejores precios de obleas y de termofijos, que son los materiales que determinan en gran medida el costo de estos dispositivos.

## CONCLUSIONES

La realización de este trabajo contribuyó de manera importante al desarrollo de la tecnología de los rectificadores 1N4000. De hecho, se rebasaron los objetivos inicialmente planteados, los cuales iban a ser los de una revisión cuidadosa de esta tecnología así como una introducción a la física de los semiconductores y de las uniones pn hasta estructuras pin.

Con este estudio se mostró que esta separación química es posible obtenerse con una calidad suficiente, entre otros logros importantes.

Los resultados de dispositivos terminados son ampliamente satisfactorios, mostrándose en el último capítulo fotografías de dispositivos a nivel oblea.

Queda pendiente aún revisar otros procesos como el estañado, el de separación química pero ahora con muestras difundidas, etc.

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que se debe continuar este desarrollo hasta lograr una tecnología con alto control de calidad, lo cual podría permitir un desarrollo industrial.



## B I B L I O G R A F I A

- 1) **SORAB K. GHANDHI** SEMICONDUCTOR POWER DEVICES. Ed JOHN WILEY AND SONS. ( 1967).
- 2) **Y. C. KAD AND D. R. MUSS.** ANALYTICAL DESIGN THEORY FOR HIGH VOLTAGE PIN RECTIFIERS. SOLID STATE ELECTRONICS, VOL. 13 pág.825-841 ( 1970 ).
- 3) **B. J. BALIGA.** MODERN POWER DEVICES . Ed. JOHN WILEY & SONS. (1968).
- 4) **A. S. GROVE** PHYSICS AND TECHNOLOGY OF SEMICONDUCTOR DEVICES. Ed. JOHN WILEY & SONS. (1967).
- 5) **YANG EDWARD** FUNDAMENTALS OF SEMICONDUCTOR DEVICES Ed. MC.GRAW-HILL (1978).
- 6) **SORAB K. GHANDHI** V.L.S.I. FABRICATION PRINCIPLES IN SILICON AND GALLIUM ARSENIDE. Ed. JOHN WILEY & SONS 1982.
- 7) **BRUK.V GRASHENIN V. KURNOSOV A.** PRODUCCION DE DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES. Ed. MIR (1971).
- 8) **B. SHWARTZ AND H. ROBBINS** CHEMICAL ETCHING OF SILICON IV.- ETCHING TECHNOLOGY JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY. FEBRUARY 1976.

- 9) H. ROBBINS AND  
B. SHWARTZ  
CHEMICAL ETCHING OF SILICON  
II.- THE SYSTEM  $\text{HF}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  AND  $\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2$   
JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL  
SOCIETY. FEBRUARY 1960.
- 10) WERNER KERN  
CHEMICAL ETCHING OF SILICON, GERMANIUM,  
GALLIUM ARSENIDE AND GALLIUM PHOSPHIDE.  
RCA REVIEW; VOL. 39; JUNE 1978.
- 11) N. FELDSTEIN  
TWO ROOM-TEMPERATURE ELECTROLESS NICKEL  
PLATING. BATHS-PROPERTIES AND  
CHARACTERISTICS. RCA; JUNE 1970.
- 12) N. FELDSTEIN  
ELECTROLESS PLATING IN THE SEMICONDUCTOR  
INDUSTRY. SOLID STATE TECHNOLOGY  
DECEMBER 1973.
- 13) JOHN H. EIGEL  
ELECTROLESS NICKEL PLATING FOR MAKING  
OHMIC CONTACTS TO SILICON. JOURNAL OF  
THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY. APRIL 1957.
- 14) N. P BOGORODITSKI  
V. V. PASINKAV  
B.M. TAREIEV.  
MATERIALES ELECTROTECNICOS. Ed. MIR 1978.