



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

Unidad Zacatenco
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Sección de Electrónica del Estado Sólido

Teoría y Práctica del Diseño de un SCR con alta
capacidad de conmutación.

Tesis que presenta

Salomón Ledezma y Guzmán.

Para Obtener el Grado de

Maestro en Ciencias

En la Especialidad de

Ingeniería Eléctrica

Director de la Tesis : Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca.

México, D.F.

Enero de 2005

AGRADECIMIENTOS

A Motorola (hoy On Semiconductor) y CINVESTAV por el apoyo al programa de Maestría de Electrónica de Estado Sólido con el CINVESTAV.

Con cariño a mi familia por su comprensión, ánimo y apoyo que me motivarán a seguir adelante, mostrado durante el tiempo de clases y por las muchas horas que no compartimos.

A mis profesores, asesores y amigos por sus conocimientos, comprensión, y guía durante las clases y desarrollo de Tesis.

A mis compañeros de estudio por los momentos de apoyo mutuo durante las largas horas de estudio que compartimos, y por los momentos emocionantes que representarán un reto en nuestra carrera profesional.

A mis compañeros de trabajo que me apoyaron económicamente y asignaron el tiempo disponible para la construcción, ensamble y caracterización de las obleas en la Planta de Guadalajara.

*Salomón Ledezma Y Guzmán
Enero 2005.*

INTRODUCCIÓN

Desde el desarrollo de las celdas de rectificadores de germanio de cristales individuales de área-grande a inicios de los 50's, una revolución ha ocurrido en la conversión y control eléctrico de potencia.

Los dispositivos de varias capas (pnpn, pnpnp) fueron presentados por primera vez en 1956 por la Bell Telephone Laboratories. Su introducción comercial no fue sino hasta los 60's liderados por la General Electric Co., con la invención del tiristor; su denominación es tiristor, o SCR (Silicon Controlled Rectifier).

Los dispositivos SCR's de potencia han encontrado su camino en cada fase de la generación, distribución y control de potencia. Estos, a diferencia de los dispositivos de señal, son limitados por lo general en sus capacidades térmicas. Esto significa que hay un énfasis en la caracterización del dispositivo dentro de ciertos rangos de variación de corriente y voltaje para garantizar un área segura de operación (SOA) de los dispositivos. Estos efectos se asocian a centros de calor localizado en áreas específicas que son pequeñas comparados con el área del dispositivo total. La ruptura secundaria es un ejemplo de un problema debido a un calentamiento localizado.

En los tiristores los fenómenos de calor localizado es un problema muy serio durante el encendido, éstos pueden provocar que en la vecindad del gatillo, se concentre rápidamente la corriente de carga debido a variaciones de voltaje y corriente externos. Estas variaciones de incremento de corriente (di/dt) y de voltaje (dv/dt), son consideradas como unas de las características dinámicas más importantes de los tiristores, y se deben de considerar prácticas seguras durante el diseño y aplicación de las especificaciones de los dispositivos de potencia. Otra característica importante es el tiempo de apagado el cual está relacionado con la conmutación de los tiristores.

El objetivo de esta tesis es que se analicen los factores y consideraciones importantes durante el diseño de un tiristor, justificando mediante los fundamentos básicos y teóricos de la física del Tiristor y del porqué de las cosas. Esto se lleva a cabo desarrollando un nuevo dispositivo con un concepto novedoso de gatillo para mejorar las características estáticas y dinámicas del dispositivo. Se verán los fundamentos de diseño, el desarrollo de las mascarillas, y la descripción de los procesos básicos de tecnología de obleas, ensamble y prueba de unidades, así como las caracterizaciones necesarias para determinar la viabilidad del dispositivo propuesto.

Estos nuevos dispositivos son menos sensibles a disparos parásitos, o a variaciones de voltaje y corriente, y vienen a eliminar las limitaciones del producto actual; estos son de alto interés en el mercado de aplicación de encendido de automotores (lanchas, motos, carros, etc.).

La tesis se compone de los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Modelo teórico del SCR: *se ve en este capítulo la teoría del SCR, desde un punto de vista simplificado, su equivalencia en dos transistores bipolares pnp y npn, sus bases de diseño, las aplicaciones de los mismos y las variables de entrada y de respuesta.*

Capítulo 2: Diseño del prototipo del tiristor propuesto y las mascarillas asociadas: *En este capítulo se verá el experimento que se diseñó para construir los tiristores de esta tesis, y la descripción de los procesos para construirlo. Se mencionan los pasos tecnológicos de un proceso de obleas semiconductoras, que hoy en día es muy común encontrar en cualquier planta de producción. Se revisan*

las variables de entrada y salida para estudiar el nuevo diseño, comparado con el diseño normal. Se revisan las bases de diseño para el tiristor con gatillo en la esquina.

Capítulo 3: Condiciones de diseño y fabricación de los tiristores: caracterización física y eléctrica:

En este capítulo se ven los resultados obtenidos de las mediciones físicas y eléctricas de los diferentes procesos para ambos grupos de control y prueba, así como las corridas que se generaron en el proceso tecnológico del área de obleas. Se revisan las principales pruebas eléctricas. Se analizan los procesos tecnológicos del área de obleas los cuales fueron importantes para el nuevo diseño de gatillo contra los procesos normales. Se revisan fotos de microsecciones de los dados semiconductores de ambos grupos como una forma de comparar la realidad física de los dispositivos con la teoría.

Capítulo 4: Pruebas eléctricas dinámicas a las unidades empaquetadas: *En este capítulo se ven las diferentes pruebas de caracterización en el área de los tiristores. Las pruebas dv/dt y di/dt se ven a detalle pues son las que definen si el nuevo diseño cumplirá con los objetivos de esta tesis para demostrar que el nuevo dispositivo resuelve el problema de fallos de los tiristores en arranque de motores.*

Capítulo 5: Conclusiones *En este capítulo se verán las principales conclusiones de este experimento al usar obleas con gatillo en la esquina contra las usadas con el gatillo en la orilla.*

Durante el desarrollo de esta tesis se empleó tecnología existente de la fábrica de obleas de On Semiconductor en Guadalajara, y se trató de aprovechar al máximo las condiciones de proceso ya establecidas, no sin antes revisar resultados esperados teóricamente. El nuevo diseño se llevó a cabo modificándose las mascarillas del frente para las operaciones de cátodo, vidrio y metales, manteniendo las mascarillas de dorso iguales al proceso normal. Dichas mascarillas se mandaron construir especialmente con el respectivo proveedor calificado. Las obleas fueron construidas, probadas, ensambladas y probadas eléctricamente, para posteriormente realizar la caracterización dinámica y estática en el laboratorio de aplicaciones. El proceso seleccionado fue el del soldado de alambre, siguiendo el flujo ya existente desde obleas hasta el ensamble/prueba.

Cabe hacer énfasis que los objetivos son: primero, contar al final con un dispositivo tiristor mejor que el actual, con características dv/dt , di/dt mejores que su equivalente en el diseño original. Esto permitiría tener un portafolio más amplio, y cubrir necesidades más exigentes de los clientes, en las cuales el producto normal ya empieza a tener limitaciones. Como segundo objetivo, desde el punto de vista académico, se tendría conocer la tecnología de procesamiento de obleas, los procesos de ensamble y prueba final, caracterizaciones estática y dinámica, y las bases del diseño de mascarillas y dispositivos, empleados en una fábrica de semiconductores en las condiciones del mercado en el momento del desarrollo de esta tesis.

INDICE

Portada		1
Agradecimientos		2
Introducción		3
Indice		5
Capítulo 1	Modelo teórico del SCR.	
1.1	Modelo teórico del tiristor	7
1.2	El SCR y sus características de corriente-voltaje	9
1.3	Descripción general del SCR	10
1.4	Funcionamiento del SCR	11
1.4.1	Caraterísticas V-I del SCR	11
1.5	Caraterísticas básicas en la construcción del SCR	13
1.6	Bloqueo en inversa	15
1.7	Bloqueo en directa	18
1.8	Voltaje de ruptura en directa	22
1.9	Aplicaciones de los tiristores	25
	Resumen	25
Capítulo 2	Diseño del prototipo del tiristor propuesto y las mascarillas asociadas.	
2.1	Descripción general del experimento de la tesis.	26
2.2	Tecnología de obleas	27
2.3	Definición de variables de entrada y salida.	31
2.4	Bases de diseño	32
2.4.1	Estructura de SCR	34
2.4.2	Conceptos y bases de diseño	39
	Resumen	42
Capítulo 3	Condiciones de diseño y fabricación de los tiristores: caracterización física y eléctrica.	
3.1	Definición del experimento	43
3.2	Grupos de corridos de fabricación de obleas.	45
3.3	Identificación de las obleas dentro de los grupos de cada oblea.	45
3.4	Parámetros eléctricos del grupo de control de prueba.	48

3.5	Valores esperados en el área de obleas.	49
3.6	Fabricación de mascarillas	49
3.7.	Análisis de las obleas del prototipo.	51
3.8	Pruebas eléctricas de los grupos fabricados (a nivel oblea)	56
3.8.1	Monitor de class probe	56
3.8.2	Prueba final de obleas por 48A	58
3.9	Comparación de resultados entre grupos (a nivel obleas)	63
3.10	Comparación de resultados eléctricos en los grupos de Ensamble	64
3.11.	Prueba eléctrica de unidades encapsulados	67
3.11.1	Descripción de prueba eléctricas	67
3.11.2	Las pruebas estáticas	67
3.11.3	Las pruebas dinámicas.	67
	Resumen	68

Capítulo 4 Pruebas eléctricas dinámicas a las unidades empaquetadas:

4.1	Pruebas de caracterización	69
4.2	Definiciones	70
4.3	Descripción de las pruebas dinámicas	71
4.3.1	Caracterización paramétrica	71
4.3.2	Inmunidad al ruido (dv/dt)s	71
4.3.3	Capacidad de conmutación (di/dtC)	73
4.4	Resultados de las pruebas dinámicas	76
4.4.1	Comparación de resultados de las pruebas dinámicas entre grupos	76
4.4.2	Resultados de dv/dt, realizada a alta temperatura, T=125°C	77
4.4.3	Resultados de di/dt, realizada a temperatura ambiente, T=25°C	77
	Resumen	84

Capítulo 5 Conclusiones.

	Bibliografía	87
--	--------------	----

CAPITULO 1

Modelo teórico del SCR

Introducción: Desde que apareció el tiristor en los años sesentas, ha pasado a constituir una parte importante en la construcción de aplicaciones de potencia. La facilidad con que es controlado, su tamaño reducido, rápida respuesta, alta precisión y bajo costo de fabricación han hecho que este sea el dispositivo semiconductor preferido para el control de motores de AC/DC, control del factor de potencia, sistemas de interrupción, etc. En este capítulo se describirá la teoría del modelo del SCR, desde un punto de vista simplificado, (se desarrollará siguiendo el modelo clásico de su equivalencia en dos transistores bipolares pnp y npn), se discutirán las aplicaciones de los SCR's, y las variables de entrada y de respuesta para su diseño.

1.1 Modelo teórico del tiristor. [1,3,14]

El SCR es parte de la familia de los tiristores, son dispositivos semiconductores de cuatro o cinco capas (p-n-p-n y p-n-p-n-p). Estos actúan como interruptores de estado sólido cuando son llevados a ciertas condiciones de voltaje y corriente, éstas son conocidas como estados de operación de los tiristores. Se tienen cuatro principales: *estado de bloqueo inverso*; *estado de bloqueo directo*; *estado de encendido inverso* y *estado de encendido directo*. En cada uno de estos estados se establecen condiciones de alta y baja impedancia dependiendo de las polarizaciones de sus terminales.

La aplicación práctica es cuando el dispositivo cambia de un estado a otro, por ejemplo cuando cambia de una condición de alta impedancia, baja corriente (conocido como estado de apagado) a uno de baja impedancia, alta corriente (estado de conducción) y viceversa.

Para la aplicación exitosa de los tiristores, es necesario un entendimiento de sus características principales, valores máximos de polarización corriente-voltaje-tiempo, y limitaciones, así como sus interrelaciones entre ellas y los circuitos de diseño.

En la familia de los tiristores tenemos dos principales tipos de dispositivos: los SCR's y los TRIAC's. Varios tipos diferentes de tiristores se muestran en la tabla 1.1. [1]

Designación JEDEC	Designación popular
Tiristor diodo de bloqueo inverso	Diodo de cuatro capas, Switch Unilateral de Silicio (SUS)
Tiristor triodo de bloqueo inverso	Rectificador Controlado de Silicio (SCR)
Tiristor diodo de conducción inversa	Diodo de cuatro capas de conducción inversa
Tiristor triodo de conducción inversa	SCR de conducción inversa
Tiristor triodo bidireccional	TRIAC

JEDEC: Son las siglas en Inglés de Joint Electron Device Engineering Council (Consejo de Ingeniería de Dispositivos Electrónicos Unidos), ésta es una asociación enfocada a la estandarización en la industria electrónica, promovida y soportada por la Asociación de Industrias Electrónicas (EIA, Electronic Industries Association) y la Asociación de Manufactureras Eléctricas Nacionales (NEMA, National Electrical Manufacturers Association).

Tabla 1.1 Tipos de tiristores

La terminología de los tiristores difiere de la usada en los transistores. A continuación se da una lista de los principales conceptos usados en los SCR's, y que son empleados en esta tesis. [1, 2, 3]:

1) *Voltaje en directa:* V_{DRM} (V)

El voltaje positivo aplicado al ánodo y negativo al cátodo.

2) *Voltaje inverso:* V_{RRM} (V)

El voltaje negativo aplicado al ánodo y positivo al cátodo.

3) *Voltaje de estado apagado:*

Es el voltaje principal cuando el tiristor está en el estado apagado.

4) *Voltaje de rompimiento:* V_{BR} (V)

Es el voltaje principal en el punto de rompimiento.

5) *Voltaje del estado de encendido:* V_{TM} (V)

Es el voltaje principal cuando el tiristor está en el modo de encendido.

6) *Voltaje de gatillo:* V_{GM} (V)

Es el valor del voltaje permitido entre las terminales de gatillo y cátodo para una polarización dada.

7) *Voltaje de disparo de gatillo:* V_{GT} (V)

Es el valor del voltaje requerido para producir la corriente de disparo de gatillo.

8) *Corriente del estado de encendido:* I_{TM} (A)

Es la corriente principal cuando el tiristor está en el modo de encendido.

9) *Corriente en directa:* I_{DRM} (A)

Para un tiristor en estado de bloqueo inverso, es la corriente principal de la terminal con voltaje positivo en el ánodo con respecto a la terminal cátodo.

10) *Corriente en inversa:* I_{RRM} (A)

Para un tiristor en estado de bloqueo inverso, es la corriente principal de la terminal con voltaje negativo en el ánodo con respecto a la terminal cátodo.

11) *Corriente de sostenimiento:* I_H (A)

Es la mínima corriente principal requerida para mantener al tiristor en el estado de encendido. Abajo de esta corriente el dispositivo regresará al estado de bloqueo en directa.

12) *Corriente de disparo de gatillo:* I_{GT} (A)

Es la máxima corriente de gatillo requerida para que el dispositivo conmute del estado de apagado al de encendido bajo condiciones establecidas de polarización.

13) *Razón crítica del incremento del voltaje de apagado:* dV/dt (V/ μ s)

Es el valor mínimo de la razón de incremento del voltaje principal el cual puede causar la conmutación del estado de apagado al de encendido del tiristor.

14) *Razón crítica del incremento de la corriente del estado de encendido:* di/dt (A/ μ s)

Es el máximo valor de la razón de incremento de la corriente de estado de encendido la cual un tiristor puede soportar sin deteriorarse.

1.2. El SCR y sus características de corriente-voltaje. [1,4,12,15,16]

El SCR es un dispositivo semiconductor de 4 capas, que tiene un solo sentido de conducción. Las siglas significan en inglés **Silicon Controlled Rectifier** (Rectificador Controlado de Silicio). Su símbolo se puede ver en la Figura 1.1.

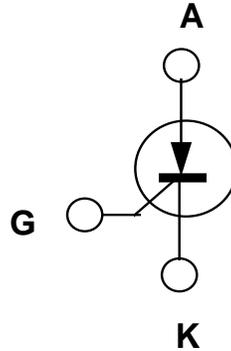


Fig 1.1 Símbolo del SCR.

Se conoce también como tiristor triodo de bloqueo inverso; generalmente tienen tres terminales externas: ánodo (A), cátodo (K) y gatillo (G).

Para el estudio del tiristor partiremos de una estructura de silicio (Fig. 1.2) ya terminada denominada “dado” (fig. 1.2a), que es en sí el corazón del dispositivo y que contiene todas las capas que permiten tener un tiristor funcional.

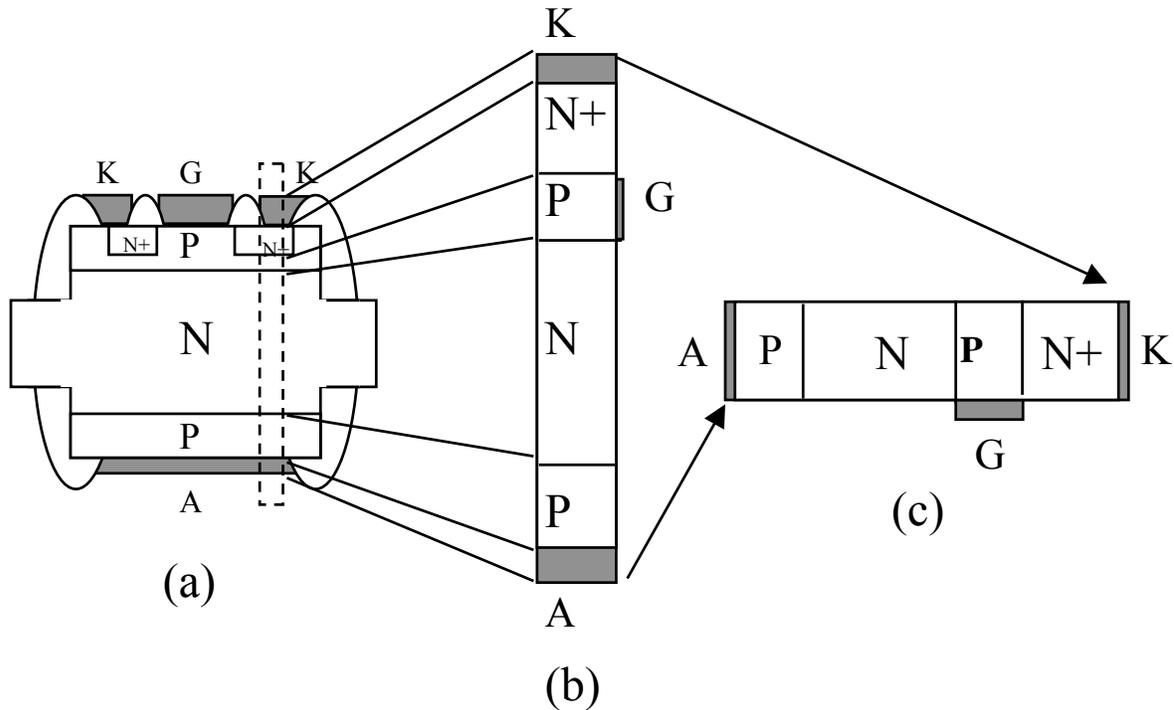


Fig 1.2. Secciones transversales simplificadas para el estudio del tiristor. (a) Sección transversal de un dado de silicio de un tiristor. (b) Corte vertical de la sección transversal, (c) Sección transversal usada universalmente para el estudio y explicación del funcionamiento del tiristor.

Ya que éste fue el primer diseño para los dispositivos de cuatro capas, al SCR se le denomina comúnmente “tiristor”, así cuando uno dice tiristor se refiere al SCR y viceversa. La teoría de electrones y huecos del transistor bipolar para los fenómenos de transporte se usan ampliamente para explicar el funcionamiento del tiristor [4].

1.3. Descripción general del SCR: [2, 3, 4]

El SCR se puede considerar como un transistor “n-p-n” con una capa “p” adicional (Figura 1.2c y 1.3).

El emisor “n” de tal estructura es el cátodo del dispositivo, la capa adicional “p” es el emisor de huecos y es el ánodo del dispositivo. El contacto de la base-p de la porción del transistor n-p-n es el electrodo de control, el gatillo. En la estructura de la Figura 1.3, se muestra que consiste de dos capas de difusiones profundas de tipo “p”, la primera P1 constituye el emisor-p conocido como emisor-ánodo, y P2 la base-p, las cuales rodean una ancha base-n de baja resistividad (N1). Una capa difundida n+ forma lo que se conoce como emisor-cátodo (N2). Las capas P1, P2 y N2 están provistas de contactos óhmicos para formar las terminales de ánodo, gatillo y cátodo respectivamente.

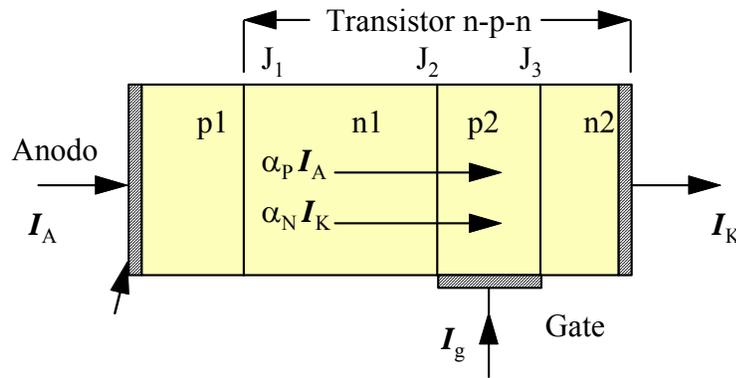


Fig 1.3. Estructura de 4 capas, transistor “n-p-n” más una capa “p”.

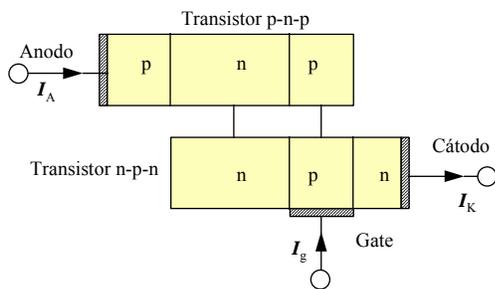


Fig 1.4. Equivalencia de dos transistores del SCR.

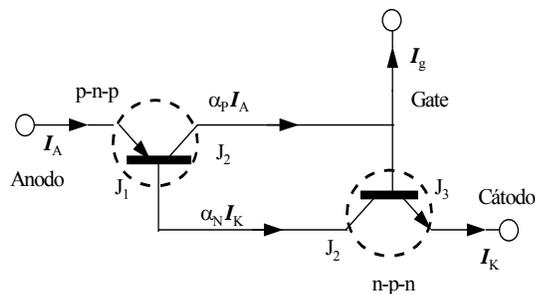


Fig 1.5. Circuito equivalente del SCR.

La estructura p-n-p-n tiene tres uniones p-n: J_1 , J_2 y J_3 (Figura 1.3) y puede también visualizarse como una combinación de dos transistores, un p-n-p y un n-p-n compartiendo un colector común a la unión J_2 (Figura 1.4). A cada transistor le es suministrada una corriente de base por el colector del otro transistor (Figura 1.5). El gatillo es generalmente conectado a la base-p del transistor n-p-n.

1.4. Funcionamiento del SCR. [2, 3, 4]

Cuando el ánodo de un tiristor se polariza en forma negativa con respecto al cátodo, el dispositivo presenta un estado de alta resistencia al flujo de corriente ánodo-cátodo. Cuando el ánodo, es ahora polarizado positivamente con respecto al cátodo, el dispositivo presenta aún este mismo modo de alta resistencia, pero si bajo esta condición se le aplica un voltaje positivo al gatillo con respecto al cátodo de tal forma que haya flujo de corriente del gatillo al cátodo, entonces el dispositivo cambia de un estado de alta resistencia a uno de baja impedancia, y la corriente fluye libremente de ánodo a cátodo. La transición del estado de apagado al estado de encendido ocurre muy rápidamente, y este permanecerá encendido aún después de remover la señal en el gatillo. La conmutación del estado de encendido al de apagado, no se hace normalmente con el gatillo, pero sí con circuitos externos, el dispositivo pasará al estado de apagado cuando la corriente ánodo-cátodo es reducida abajo de un valor crítico conocido como corriente de sostenimiento (I_H).

Cuando un potencial positivo es aplicado al ánodo, las uniones J_1 y J_3 quedan polarizadas directamente, y una corriente de saturación pequeña empieza a fluir desde la unión de colector J_2 (Figura 1.5). Esta unión queda polarizada inversamente y bloquea el flujo en forma significativa, a pesar de que las otras dos uniones están polarizadas directamente. Se dice que el dispositivo está en el estado de bloqueo directo. Si ahora el potencial aplicado al ánodo es negativo, las uniones J_1 y J_3 quedan polarizadas inversamente y la unión J_2 directamente. Ahora las uniones J_1 y J_3 bloquearán en forma significativa el flujo de corriente. La capacidad de bloqueo directo e inverso existirá mientras que los potenciales aplicados estén por debajo del voltaje de ruptura de la unión J_2 o la suma de los voltajes de ruptura de las uniones J_1 y J_3 , con la condición de que no se le aplique voltaje positivo al gatillo.

Consideremos ahora la situación cuando el dispositivo está primero en la condición de bloqueo directo (la unión J_2 está polarizada inversamente). Si se le aplica suficiente voltaje positivo al gatillo, el cátodo tipo-n empieza a emitir. El transistor n-p-n conduce y provee de corriente a la base del transistor p-n-p, debido a la existencia de retroalimentación regenerativa cuando el lazo de ganancia excede la unidad, ambos transistores serán llevados a saturación después de un pequeño tiempo de retardo. Esto significa que las tres uniones (J_1 , J_2 y J_3) llegan a estar polarizadas directamente, la impedancia del dispositivo alcanza su valor mínimo, y el dispositivo pasa al estado de conducción o de encendido [5].

1.4.1. Características V-I del SCR. [2, 3, 4]

Las regiones de trabajo del SCR, se presentan en las características V-I del SCR, mostradas en la Figura 1.6. El eje horizontal es el voltaje de Ánodo a Cátodo, y el eje vertical es la corriente de Ánodo que circula a través del dispositivo.

En el primer cuadrante puede verse la región de directa; cuando se empieza a aplicar el voltaje positivo al ánodo la corriente empieza a circular. Si continuamos aumentando el voltaje de ánodo a cátodo hasta el punto (1) se obtiene la región de bloqueo en directa, refiérase a la Fig. 1.6. En el punto (1) se tendrá el parámetro V_{DRM} . Si se continua aumentando el voltaje, no habrá mayor cambio en el V_{DRM} , las coordenadas del punto (1) son (V_{DRM}, I_{DRM}) y aquí se está en el punto de alta impedancia y baja corriente.

Continuando aplicando el voltaje, el tiristor tiene el efecto de retroalimentación regenerativa, hasta que llega al punto (2), aquí se definen las coordenadas (V_H , I_H). Al continuar con las condiciones aplicadas, el tiristor entra al estado de conducción (suma del factor de transporte 'alfa' de ambos transistores igual a la unidad) y pasa al punto (3) donde el tiristor está completamente encendido, en este momento tenemos una condición de baja impedancia y alta corriente.

Si el tiristor es polarizado inversamente se está en el tercer cuadrante, que es la región inversa. Al ánodo se le aplica un voltaje negativo. Aquí se comporta como un diodo en su región inversa. Al aumentar el voltaje negativo, la fuga empieza a incrementarse y al llegar al punto (4) se dice que el tiristor está en la forma de bloqueo inverso; las coordenadas de este punto son (V_{RRM} , I_{RRM}). Al continuar aumentando el voltaje se llega al limite del bloqueo inverso y se presenta la ruptura por avalancha (Zener).

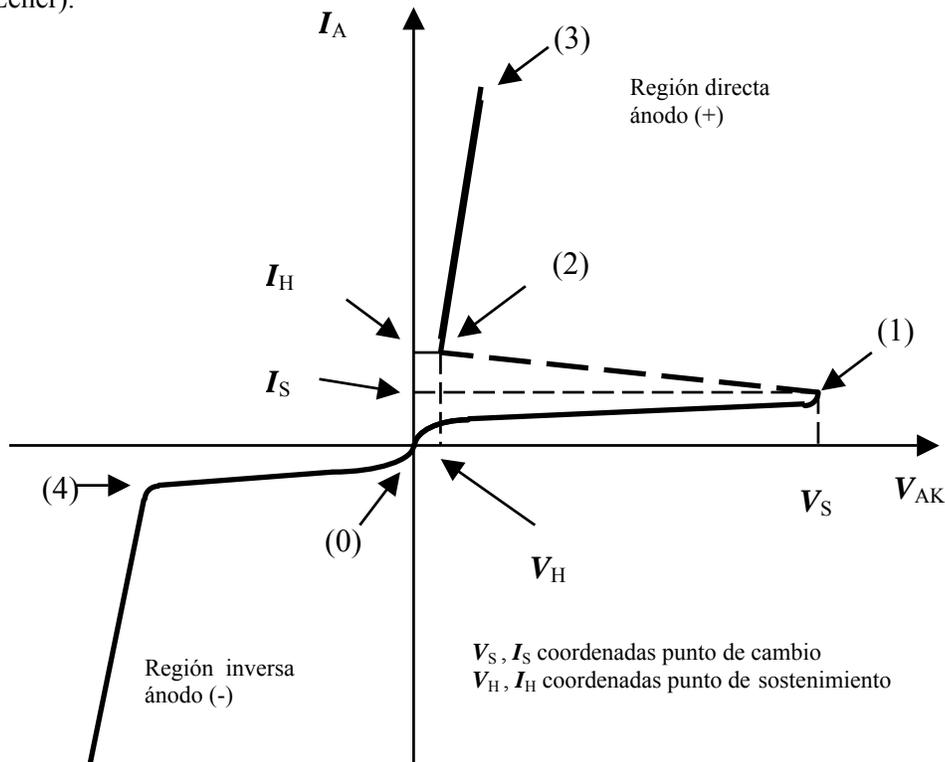


Fig. 1.6. Características I-V de un dispositivo P-N-P-N.

Los puntos de conmutación y sostenimiento del SCR se dan en la región del primer cuadrante de la característica corriente-voltaje de la Figura 1.6. El punto de cambio (1) (switching point) es definido por las condiciones: alto voltaje, baja corriente, con coordenadas V_S e I_S y con una pendiente igual a la derivada del voltaje con respecto al tiempo igual a [2]:

$$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{x = cte} = 0 \quad (1.1)$$

El otro punto de interés es el punto de sostenimiento (2) caracterizado por: bajo voltaje, baja corriente, con coordenadas V_h e I_h y con una pendiente igual a [2]:

$$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I_G = cte} = 0 \quad (1.2)$$

La ganancia de corriente del dispositivo es usualmente no uniforme sobre el área de conducción total del SCR. La corriente del gatillo es aplicada en forma de pulsos de duración corta. Debido a estas dos condiciones, la corriente mínima de anclaje requerida para un encendido positivo será mayor que la corriente de sostenimiento.

El punto de cambio (voltaje de ruptura) es una función sensible al cambio de la magnitud de corriente en el gatillo, así es posible graficar una familia de curvas características de corriente-voltaje del SCR y graficarlas teniendo como parámetro la corriente del gatillo (I_G). Cuando mayor es el voltaje del gatillo, el punto de cambio (ruptura) es menor (Figura 1.7).

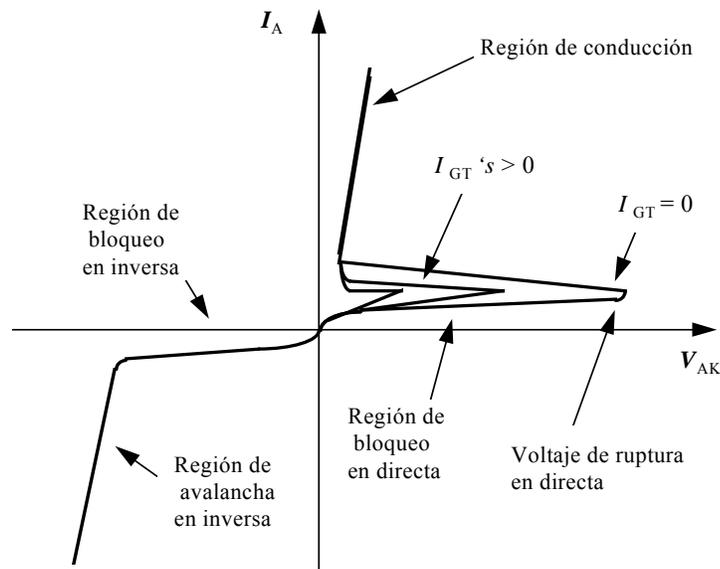


Fig. 1.7. Familia de características I-V de un SCR variando I_{GT} .

1.5. Características básicas en la construcción del SCR. [4,11,16]

En la Figura 1.8 (a) se representa la construcción convencional de la parte superior de un dispositivo con el gatillo localizado en el centro. Este arreglo representa muchas ventajas desde el punto de vista de la física del dispositivo. En la parte (b) se encuentra una sección transversal del dispositivo. Nótese que la metalización del cátodo se extiende más allá del mismo cátodo, teniéndose así que el perímetro del cátodo completo está en corto con la base-p. Estos “cortos” en el emisor mejoran el desempeño del dispositivo a temperaturas elevadas y a voltajes de variación rápidos de ánodo-cátodo (V_{AK}).

Un perfil típico de dopado para un SCR construido por difusión se muestra en la Figura 1.9. La región de base-n generalmente está ligeramente más dopada para dispositivos de alto voltaje.

A continuación se revisarán las tres características importantes de corriente-voltaje de un tiristor, ya mencionadas: bloqueo en inversa; bloqueo en directa (estado de apagado) y modo de conducción en directa (estado de encendido):

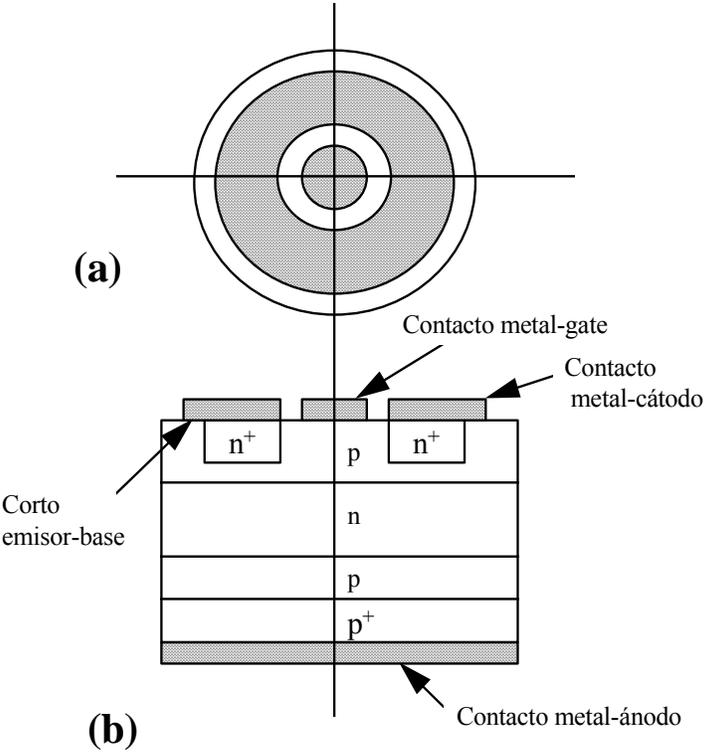


Fig. 1.8. Construcción básica de un SCR.

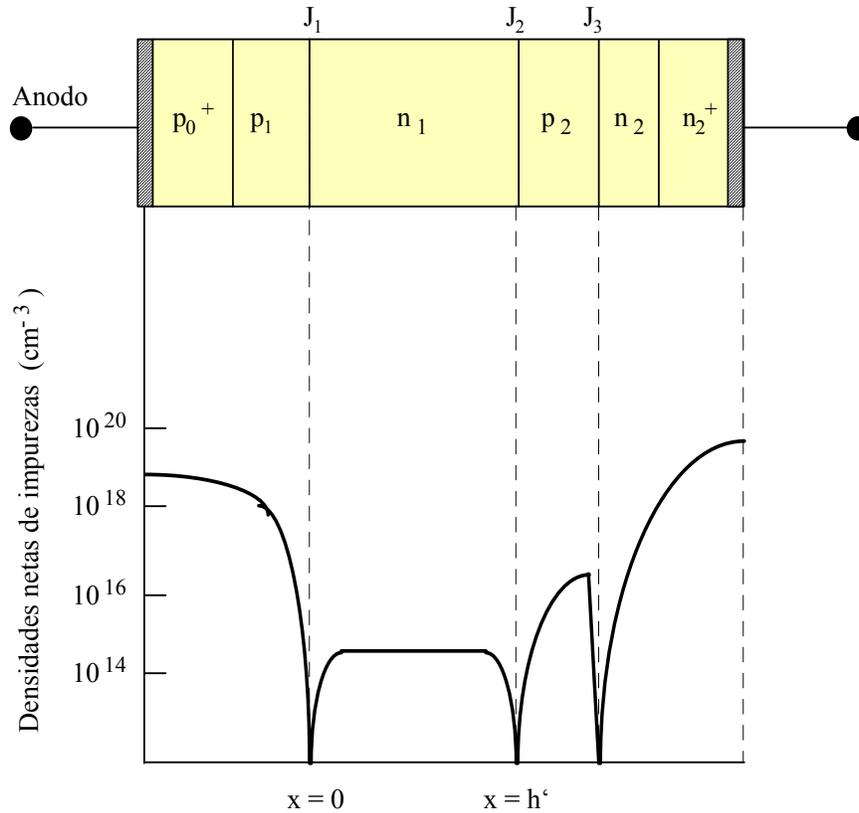


Fig. 1.9. Perfil típico de densidad de impurezas de un dispositivo p-n-p-n.

1.6. Bloqueo en inversa. [4,5,12,14]

En esta configuración el tiristor se comporta en forma semejante a un diodo de unión pn polarizado inversamente. Se iniciará con el repaso del concepto de voltaje de ruptura. El tiristor tiene dos bloqueos o dos voltajes de ruptura: el bloqueo en directa (voltaje de ruptura en directa) y el voltaje de ruptura en inversa. Como se sabe, son dos factores básicos los que limitan el fenómeno de ruptura: cuando se tiene una ruptura por avalancha o cuando se tiene una ruptura por alcance (la zona de deserción crece hasta alcanzar una segunda unión), poniéndose en corto el dispositivo.

En el modo de bloqueo inverso, se le aplica un voltaje negativo al ánodo y uno positivo al cátodo. Las uniones J₁, y J₃ quedan polarizadas inversamente, mientras que la unión J₂ queda polarizada directamente (figura 1.10). Debido a que la región N₁ está ligeramente dopada, la mayoría del voltaje inverso caerá en esta región, véase el perfil típico de impurezas en la figura 1.9. Dependiendo del grueso de la capa N₁ (W_{n1}), la ruptura será causada por avalancha si el ancho de la zona de deserción en la ruptura es menor que W_{n1}, o será por alcance si el ancho de la zona de deserción, llena completamente la región W_{n1} en la cual la unión J₁ se pone prácticamente en corto con la unión J₂.

Las ecuaciones de ruptura por avalancha a temperatura ambiente para una unión abrupta (p⁺ - n), y para una lineal son [3,4,5,6]:

$$V_B = 5.34 \times 10^{13} (N_{n1})^{-0.75} \quad \text{V} \quad (\text{abrupta}) \quad (1.3)$$

$$V_B = 9.17 \times 10^9 a^{-0.4} \quad \text{V} \quad (\text{lineal}) \quad (1.4)$$

donde: V_B = Voltaje de ruptura por avalancha multiplicativa.
 N_{n1} = Concentración del dopante de la región N1.
 a = Gradiente de concentración para la unión lineal.

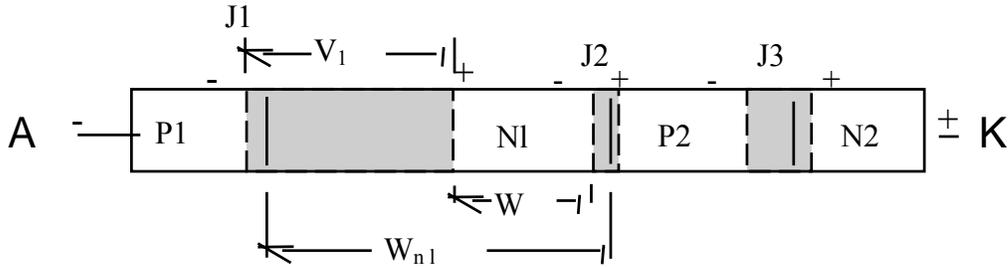


Fig. 1.10. Bloqueo inverso en un tiristor: las uniones J1, J3 están polarizadas inversamente y la unión J2 directamente.

El voltaje de ruptura por alcance está dado por [3,4]:

$$V_{PT} = \frac{qN_{n1}W_{n1}^2}{2\epsilon_s} \quad \text{V} \quad (1.5)$$

donde: V_{PT} = Voltaje de ruptura por alcance.
 N_{n1} = Concentración del dopante de la región N1.
 W_{n1} = Espesor de la capa N1.
 ϵ_s = Permitividad del semiconductor (silicio).

La figura 1.11 muestra los límites de capacidad de bloqueo inverso de los tiristores hechos de silicio. Se ha encontrado que a bajos niveles de concentración del dopante el voltaje de ruptura está limitado por “alcance” y para altos niveles por “avalancha multiplicativa”.

Para nuestro caso en particular, se tienen aproximadamente los siguientes valores:
 $N_{n1} = 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} - 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ (predepósito) $N_{n1} = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} - 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (redistr.)
 $W_{n1} = 12 \text{ } \mu\text{m}$ (aprox), para un voltaje objetivo en el proceso de obleas de 800 a 1200 volts.

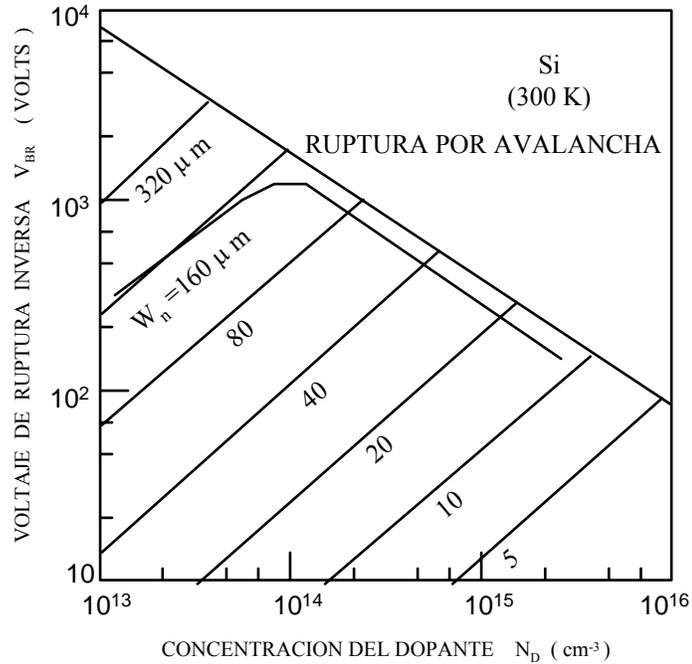


Fig. 1.11. Capacidad de bloqueo inverso del tiristor de silicio. La línea de voltaje de ruptura por avalancha indica el máximo voltaje logrado por la capa N1 en función de la cantidad de dopante. La línea paralela indica el voltaje de ruptura por alcance para diferentes anchos de la capa N1.

Como el tiristor se puede analizar asemejándolo a dos transistores bipolares de unión, esto es, a un transistor pnp unido por el colector en la base de un npn, se puede aproximar a como si se tuviera la configuración de emisor común para facilitar el análisis.

En la configuración de emisor-común las condiciones de voltaje de ruptura inversa son [4] :

$$M = 1 / \alpha_1 \quad \text{factor multiplicativo por avalancha} \quad (1.6)$$

$$V_{BR} = V_B (1 - \alpha_1)^{1/n} \quad \text{voltaje de ruptura inversa} \quad (1.7)$$

donde: M = Factor multiplicativo por avalancha

α_1 = Ganancia de corriente en la configuración base-común del transistor p-n-p.

V_B = Voltaje de ruptura por avalancha de la unión P1-N1.

n = Constante numérica: ≈ 6 para diodos p⁺-n; ≈ 4 para diodos n⁺-p.

Debido a que $(1 - \alpha_1)^{1/n}$ es menor que la unidad, el voltaje de ruptura inversa (V_{BR}) de un tiristor será menor que el voltaje de ruptura por avalancha (V_B). Se puede estimar el impacto de α_1 en V_{BR} . Ya que la región P2 está altamente dopada, la ganancia de corriente es igual al factor de transporte α_T y su relación es [3]:

$$\alpha_1 = \gamma \alpha_T \approx \alpha_T = \text{sech} (W / L_{n1}) \quad (1.8)$$

donde: α_1 = Ganancia de corriente en la configuración base-común

γ = Eficiencia de inyección del emisor a la base.

α_T = Factor de transporte.

L_{n1} = Longitud de difusión de los huecos en la región N1.

W = Está definida de acuerdo a la figura 1.10 y en forma analítica está dada por:

$$W = W_{n1} [1 - (V/V_{PT})^{1/2}]. \quad (1.9)$$

Para valores dados de W_{n1} y L_{n1} , la razón W/L_{n1} se reducirá conforme el voltaje inverso aumenta, y el factor de transporte, (α_T), llega a ser más importante conforme el voltaje inverso se aproxima al límite de “ruptura por alcance”.

En la gráfica 1.11 se ve que para los valores calculados, el V_{BR} se aproxima al V_{PT} para bajos dopados en la region N1. Conforme el dopado aumenta, V_{BR} siempre se mantiene ligeramente abajo del V_B , debido al valor finito de la razón W/L_{n1} .

1.7. Bloqueo en directa. [4,5,14,15]

En este régimen, cuando el tiristor actúa para bloquear en directa (región 1, Fig. 1.6), los voltajes aplicados al tiristor deben ser: ánodo positivo, y cátodo negativo; aquí tiene una influencia muy importante la variación de las alfas de los transistores n-p-n y p-n-p.

Al polarizar el tiristor en forma directa, la unión central J2 está polarizada en forma inversa, mientras que las uniones J1 y J3 están polarizadas en forma directa, figura 1.12. La mayoría del voltaje aplicado caerá en la región N1. Para entender la característica de bloqueo en directa, se utilizará la analogía de los dos transistores bipolares mencionada anteriormente.

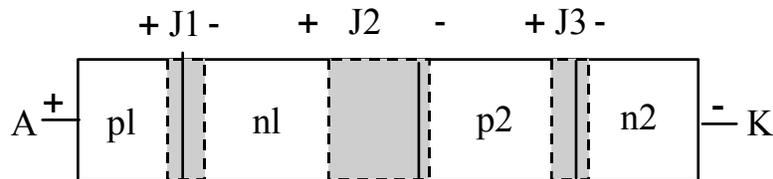


Fig. 1.12. Bloqueo directo en un tiristor: las uniones J1, J3 están polarizadas directamente y la unión J2 inversamente.

El tiristor puede ser considerado como un transistor p-n-p y un transistor n-p-n, conectados el colector de uno a la base del otro y viceversa, véanse las figuras 1.13 y 1.14. La unión J2 tiene dos funciones: actúa como colector de huecos de la unión J1 para el transistor p-n-p, y como colector de electrones desde la unión J3 del transistor n-p-n (figura 1.13).

Se denominará T1 al transistor p-n-p, y T2 al n-p-n, así el subíndice denominará de qué transistor se está hablando, (fig 1.13). La relación entre las corrientes de emisor (I_E), de colector (I_C), y de base (I_B) y la ganancia de corriente DC de la configuración base-común (α_1) para el transistor p-n-p es como sigue:

$$I_{C1} = \alpha_1 I_E + I_{C01} \quad \text{corriente de colector para el transistor p-n-p} \quad (1.10)$$

$$I_{B1} = (1 - \alpha_1) I_{E1} - I_{C01} \quad \text{corriente de base para el transistor p-n-p} \quad (1.11)$$

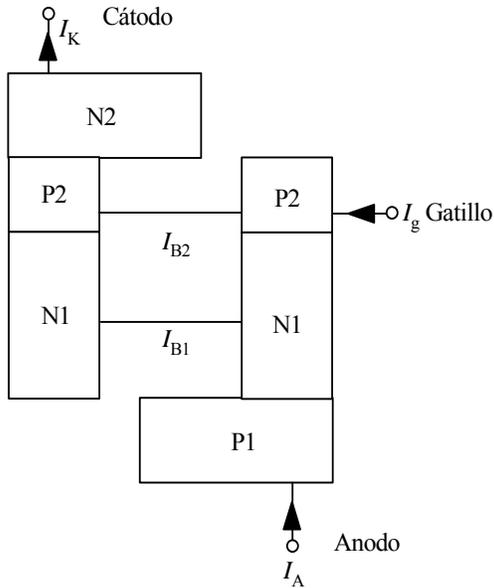


Fig. 1.13. Equivalencia del tiristor usando dos transistores bipolares.

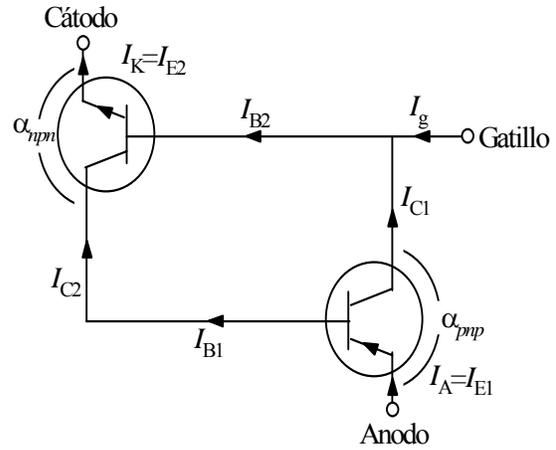


Fig. 1.14. Equivalencia con notación simbólica de transistores.

donde I_{C01} es la corriente de saturación inversa colector-base con emisor abierto, para el transistor p-n-p. Similarmente para el transistor n-p-n, las relaciones son iguales pero el sentido de las corrientes son inversas con relación al transistor p-n-p, haciendo referencia a la figura 1.15.

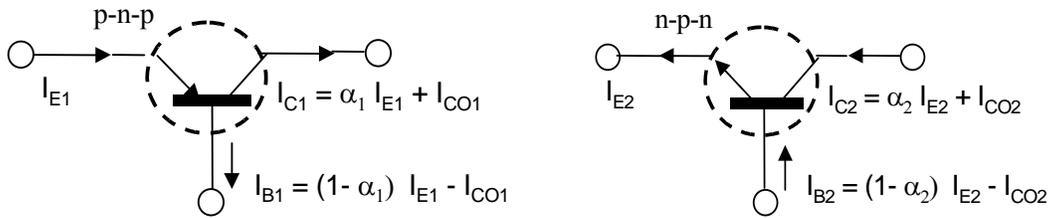


Fig. 1.15 Relaciones de corriente en un transistor p-n-p y n-p-n.

A la base del transistor n-p-n le llega corriente suministrada por el colector del transistor p-n-p y corriente del gatillo (I_g). Cuando la ganancia total exceda la unidad se tendrá el modo de regeneración.

Se tiene entonces que la corriente de base del transistor p-n-p, sustituyendo I_A con I_E en (1.11) es:

$$I_{B1} = (1 - \alpha_1) I_A - I_{C01} \quad (1.12)$$

La cual es proveída por el colector del transistor n-p-n. Sustituyendo I_K por I_E en (1.10), y como estamos hablando del segundo transistor, entonces la ganancia de corriente es α_2 , se tiene:

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{C02} \quad (1.13)$$

Se tiene entonces que

$$I_{B1} = I_{C2} \quad (1.14)$$

Y sustituyendo los valores de cada una de las ecuaciones (1.12) y (1.13)

$$(1 - \alpha_1) I_A - I_{C01} = \alpha_2 I_K + I_{C02} \quad (1.15)$$

de acuerdo a la fig. 1.14 se ve que:

$$I_K = I_A + I_G \quad (1.16)$$

simplificando y reduciendo a I_A se tiene:

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{C01} + I_{C02}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1.17)$$

Tomando en cuenta que α_1 y α_2 son funciones de la corriente de ánodo con una relación directamente proporcional, se tiene que al aumentar la corriente de ánodo, el valor de las alfas aumenta. La ecuación (1.17) nos describe la característica estática del tiristor hasta el voltaje de ruptura V_{DRM} , más allá de este punto el tiristor actúa como un diodo “p-i-n”.

Los valores del numerador en la ecuación (1.17) son pequeños y su suma se mantendrá pequeña hasta que la suma de las alfas tiendan a la unidad; cuando esto ocurre, el denominador en la ecuación (1.17) tiende a cero y entonces el voltaje de ruptura en directa ocurrirá haciendo la conmutación o cambio y la corriente de ánodo crece dentro de los límites del dispositivo (esto puede considerarse como que la corriente de ánodo crece sin límites, aunque prácticamente esto depende de la capacidad física del silicio para soportar la máxima corriente).

Conviene hacer notar, que si en este momento la polaridad del tiristor se cambiara a polarización inversa (ánodo negativo y cátodo positivo), las uniones J1 y J3 estarán polarizadas inversamente, mientras que la unión J2 lo estará directamente, bajo estas condiciones no hay condición de conmutación ya que solo la unión central actúa como emisor y el proceso de regeneración no puede llevarse a cabo.

Los anchos de las capas de deserción y los correspondientes diagramas de bandas de energía para el estado de equilibrio, de apagado en directa, y encendido en directa se muestran en la figura 1.16. En la figura 1.16 (a) condición en equilibrio, hay en cada unión de deflexión con un potencial inter construido que esta determinado por el nivel de impurezas. En la figura 1.16 (b) Estado de apagado en directa, se le aplica un voltaje positivo al ánodo, la unión J1 y J3 están polarizadas directamente y la unión J2 tenderá a estar polarizada inversamente. La caída de voltaje desde el ánodo al cátodo será aproximadamente igual a la suma algebraica de las caídas del voltaje en las uniones como sigue:

$$V_{AK} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (1.18)$$

Conforme el voltaje incrementa, la corriente también se incrementa, al mismo tiempo las alfas α_1 y α_2 se incrementan debido a la naturaleza de los procesos regenerativos, al seguir aumentando la corriente

el dispositivo eventualmente pasará al estado de encendido. Cuando se hace la conmutación, la corriente debe estar limitada por una resistencia de carga externa para evitar que el tiristor se destruya si el voltaje fuera lo suficientemente grande. En el estado de encendido, la unión J2 se polariza directamente, como se muestra en la figura 1.16(c), y la caída de voltaje V_{AK} está dada por:

$$V_1 - |V_2| + V_3 \quad (1.19)$$

la cual es aproximadamente igual a la caída de voltaje a través de una unión p-n polarizada directamente más un transistor en saturación. La conmutación del tiristor ocurre cuando:

$$\frac{dV_{AK}}{dI_A} = 0 \quad (1.20)$$

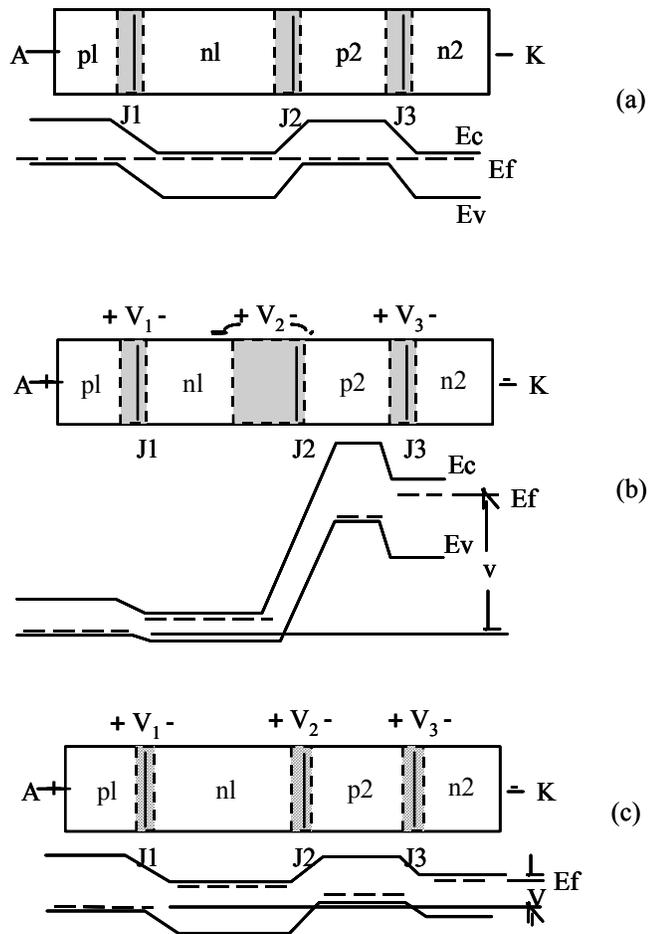


Fig 1.16 Diagrama de bandas de energía para las regiones de directa. (a) Condiciones de Equilibrio, (b) Estado de apagado en directo, donde la mayoría del voltaje cae en la unión J2. (c) Encendido en directa, donde las tres uniones están en polarización directa.

Esta condición se alcanza cuando $[2,4] \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (1.21)$

1.8. Voltaje de ruptura en directa. [2,4,5,16]

Para obtener el voltaje de ruptura en directa (V_{BF}) debemos de considerar un tiristor general con las terminales conectadas en sus cuatro capas de acuerdo a la figura 1.17. Refiera en esta figura las direcciones de los voltajes y corrientes y se asume que la unión central se encuentra polarizada inversamente, y que también la caída de voltaje en esta unión (V_2) es suficiente para producir la ruptura por avalancha multiplicativa de los portadores conforme ellos avanzan a través de la zona de deserción, para lo que se define lo siguiente:

$$M_N = \text{Factor de multiplicación de electrones} = f(V_2)$$

$$M_P = \text{Factor de multiplicación de huecos} = f(V_2)$$

Debido al factor de multiplicación, una corriente de huecos en estado estable $I_P(x_1)$ entra en la región de deserción en x_1 convirtiéndose en $M_P I_P(x_1)$ en $x = x_2$. Resultado similar se obtienen para una corriente de electrones $I_N(x_2)$ entrando en la región de deserción en x_2 , la corriente total será:

$$I = M_P I_P(x_1) + M_N I_N(x_2) \quad (1.22)$$

Ya que $I_P(x_1)$ es la corriente de colector del transistor P-N-P, ésta se puede expresar como: (fig. 1.15)

$$I_{C1} = \alpha_1 I_{E1} + I_{CO1} \quad \text{se tiene:}$$

$$\alpha_1 = f(I_A) = \alpha_1(I_A) \quad , \quad I_A = I_{E1} \quad \text{entonces}$$

$$I_P(x_1) = \alpha_1(I_A) I_A + I_{CO1} \quad (1.23)$$

Análogamente, la corriente primaria de electrones $I_N(x_2)$ es la corriente de colector del transistor n-p-n, y se puede expresar como:

$$I_{C2} = \alpha_2 I_{E2} + I_{CO2} \quad \text{se tiene:}$$

$$\alpha_2 = f(I_K) = \alpha_2(I_K) \quad , \quad I_K = I_{E2} \quad \text{entonces:}$$

$$I_N(x_2) = \alpha_2(I_K) I_K + I_{CO2} \quad (1.24)$$

Sustituyendo las ecuaciones 1.23 y 1.24 en 1.22, se tiene:

$$I = M_P I_P(x_1) + M_N I_N(x_2) = M_P [\alpha_1(I_A) I_A + I_{CO1}] + M_N [\alpha_2(I_K) I_K + I_{CO2}] \quad (1.25)$$

Suponiendo que:

$$M_P = M_N = M(V_2) = M \quad (1.26)$$

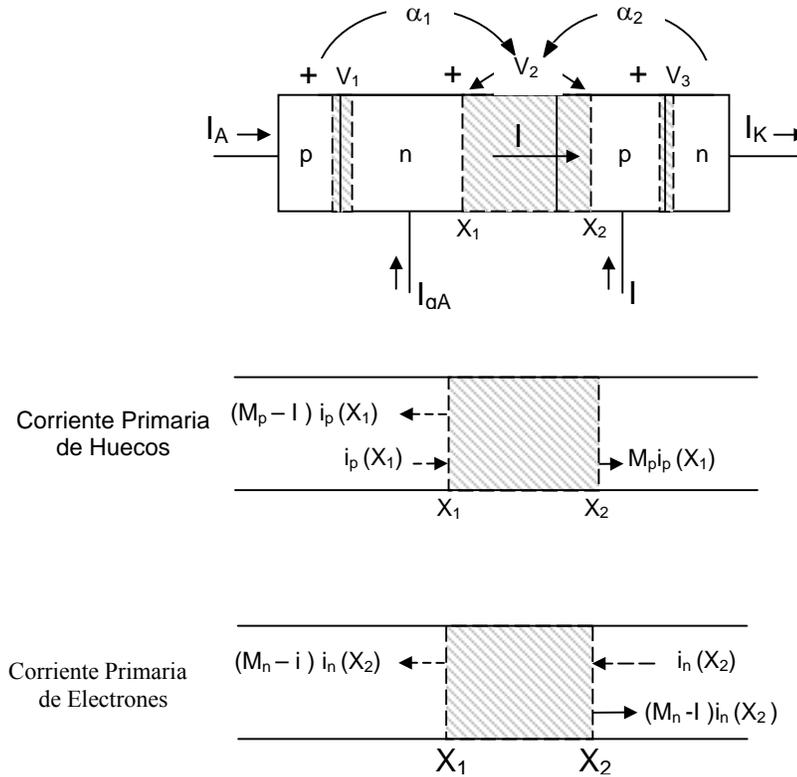


Figura 1.17 tiristor generalizado. La corriente que fluye del centro de la unión es I , de electrones y huecos generadas por condiciones de avalancha.

El factor de multiplicación está en función del voltaje V_2 , entonces factorizando queda que:

$$I = M(V_2) [\alpha_1(I_A) I_A + \alpha_2(I_K) I_K + I_p(X_1) + M_N I_N(X_2) + (I_{CO1} + I_{CO2})] \quad (1.25)$$

Si $I_{CO1} = I_{CO2} = I_O$ (1.26)

entonces:

$$I = M(V_2) [\alpha_1(I_A) I_A + \alpha_2(I_K) I_K + I_O] \quad (1.27)$$

Invirtiendo 1.27, queda como sigue:

$$\frac{1}{M(V_2)} = \frac{\alpha_1(I_A) I_A}{I} = \frac{\alpha_2(I_K) I_K}{I} = \frac{I_O}{I} \quad (1.28)$$

Si $I_g = I_{gA} = 0$ (I_{gA} = corriente de gatillo en el ánodo) y

$$I = I_A = I_K \quad (1.29)$$

se tiene entonces que:

$$\frac{1}{M(V_2)} = \alpha_1(I) + \alpha_2(I) + \frac{I_o}{I} \quad (1.30)$$

El factor de multiplicación M se puede expresar como:

$$M(V_2) = \frac{1}{1 - (V_2/V_B)^N} \quad (1.31)$$

donde: V_B = Voltaje de ruptura.
N = Constante.

El voltaje de ruptura directa (V_{BF}) puede obtenerse de la ecuación 1.29 y 1.31, bajo la condición de que $I \gg I_o$ ($I_o/I \approx 0$). Entonces, las ecuaciones pueden reescribirse como:

$$\frac{1}{M(V_2)} = \alpha_1(I) + \alpha_2(I) \quad (1.32)$$

por lo tanto:

$$M(V_2) = \frac{1}{\alpha_1(I) + \alpha_2(I)} \quad (1.33)$$

Ya que $V_2 = V_{BF}$ es el voltaje de ruptura en directa, sustituyendo en la ecuación 1.31 obtenemos:

$$M(V_2) = \frac{1}{1 - (V_{BF}/V_B)^N} = \frac{1}{\alpha_1(I) + \alpha_2(I)} \quad (1.34)$$

de aquí obtenemos el valor del voltaje en ruptura en directa:

$$V_{BF} = V_B \{ 1 - [\alpha_1(I) + \alpha_2(I)] \}^{1/N} \quad (1.35)$$

Si se compara con el voltaje de ruptura en reversa de la ecuación 1.7, reproducida a continuación

$$V_{BR} = V_B (1 - \alpha_1)^{1/n} \quad \text{voltaje de ruptura inversa} \quad (1.36)$$

muestra que el V_{BF} es siempre menor que el V_{BR} .

1.9 Aplicaciones de los tiristores. [1,6,7,9,11]

Los SCR son los más ampliamente usados para el control de potencia. Los TRIAC son populares en aplicaciones de baja corriente de AC (abajo de 40 A). Otros tipos de tiristores, como los dispositivos de disparo por voltaje (DIACS, SUS's, SBS's, etc) son usados también en aplicaciones de conmutación y circuitos de disparo, circuitos de control, osciladores, generadores de pulso, etc.

En lo relativo a la frecuencia del sistema, los tiristores son ideales en aplicaciones del orden de los 300 Hz. Para frecuencias mayores a éstas se recomienda el uso de MOSFET's por la velocidad de conmutación.

Los tiristores son los dispositivos preferidos para aplicaciones en aparatos electrodomésticos y para la inversión de potencia en líneas de transmisión de alto voltaje, debido principalmente a su característica de conmutar de un estado de encendido a uno de apagado y viceversa en forma estable, y la baja disipación de potencia durante los mismos.

Los tiristores tienen aplicaciones en todos los campos de la industria. Ya se ha mencionado que el tiristor es ideal para aplicaciones de potencia por su tamaño y baja disipación de potencia. Entre las aplicaciones principales se encuentran en circuitos de protección, control de motores de AC, controles de velocidad, controles de iluminación, control de disparo, control de fase, control de sistemas de arranque, y muchas otras.

El objetivo de esta tesis es tener un dispositivo que solucione los problemas actuales de los tiristores con el gatillo en la orilla que en aplicaciones automotrices, como arrancadores de motor de lanchas y motocicletas están generando fallas en el campo y con clientes clave. Con esto se busca tener un diseño de dispositivo menos sensible a las variaciones de voltaje, y a disparos en falso que son los modos más comunes de fallas encontradas con los clientes.

Resumen:

En este capítulo se cubrieron los fundamentos teóricos de los tiristores y sus variables principales. Se ve en detalle los modos de operación del tiristor en las regiones directa, inversa, apagado y de encendido. Se analizan los diferentes modos de voltajes de ruptura y sus principales implicaciones en el diseño de los tiristores. Se identifica cuál es el problema que originó este experimento, como problemas encontrados en el campo con clientes automotrices para los sistemas de encendido de motores. La necesidad de desarrollar un dispositivo capaz de soportar variaciones en los voltajes y evitar este tipo de fallos por dv/dt , di/dt motivó la búsqueda de nuevas opciones para tener dispositivos inmunes al ruido. Esto se verá en los siguientes capítulos.

CAPITULO 2

Diseño del prototipo del tiristor propuesto y las mascarillas asociadas.

Introducción:

En este capítulo se verá el plan que se siguió para hacer el experimento, considerando el tiristor normal con el gatillo en la orilla y al propuesto con el gatillo en la esquina. Se mencionan los pasos principales de un proceso tecnológico normal de obleas semiconductoras, que hoy en día es muy común encontrar en cualquier planta de producción. Se listan también las variables de entrada y salida para determinar y medir el desempeño del nuevo diseño, comparado con el diseño normal; estas variables son un buen indicador del proceso tecnológico de obleas. También se describen las bases de diseño para el tiristor con gatillo en la esquina en base a la experiencia con ON Semiconductor (antes Motorola).

2.1 Descripción general del experimento de la tesis. [5,7,10]

El experimento consistió en procesar y construir obleas de silicio en el flujo de manufactura de ON Semiconductor (antes Motorola) para la construcción tecnológica del silicio del tiristor usado en esta tesis. Se usó el proceso normal para el MCR8N, el cual es un tiristor SCR con el gatillo ubicado en la mitad de la orilla izquierda (visto de frente). Este es un proceso normal de producción y este dispositivo tiene ventas en el mercado mundial. Este SCR es de 800 V a 8 A máximos.

Durante este experimento se manufacturo un nuevo tiristor, SCR usando un diseño nuevo, con mejoras enfocadas a optimizar el desempeño en los valores dinámicos di/dt y dv/dt en las aplicaciones. La construcción tecnológica se hizo usando el concepto de gatillo en la esquina en vez de la orilla. Este tipo de dispositivos no existen en el mercado, hubo intentos en 1995 de iniciarlos pero no se llevaron a la práctica.

Las variables del experimento fueron:

- 1) Tiempo de penetración en la difusión de cátodo,
- 2) Cambio de mascarillas del frente para generar el diseño del gatillo en la esquina.

Las obleas construídas se procesaron con tiempos diferentes de penetración de cátodo y enmascaramiento del frente, diferente en sus respectivas operaciones. En los procesos de enmascaramiento del frente para las operaciones de fotoresistivo de cátodo, fotovidrio y metales se usó una nueva mascarilla hecha con el concepto de gatillo en la esquina. Estas mascarillas se mandaron construir especialmente para esta tesis.

La construcción de las obleas se realizó utilizando tecnología existente y procesos existentes usando recetas, temperaturas y tiempos de la producción normal para facilitar el proceso de construcción y disponibilidad de equipos, para así evitar entorpecer las actividades de producción tecnológica de procesos normales. Las obleas se construyeron en un tiempo aproximado de 8 meses, debido a requerimientos de producción y disponibilidad de equipos.

2.2 Tecnología de obleas: [1,5,7,9,10]

El proceso tecnológico empleado en ON Semiconductor para la fabricación en silicio de los tiristores, es en general el que se encuentra en cualquier fábrica de obleas que se dedique a la construcción de dispositivos discretos de cuatro o más capas. Las recetas utilizadas que incluyen los tiempos, temperaturas, condiciones de ajuste de equipo, listas de seguimiento (checklist) para inicio y auditoría, especificaciones que son parte de la exclusividad de la caracterización de los procesos que ya en una empresa se consideran internos. [7]

En la figura 2.1 se muestra la sección transversal del tiristor SCR para la referencia del diagrama de flujo seguido en su fabricación. Este es el tiristor con terminal de alambre, a diferencia del tiristor usando clip de cobre; esto hizo posible usar equipos automáticos para el montaje y soldado de alambre usando las tiras de cabezales de TO-220.

En la tabla 2.1 se muestra un resumen del plan de construcción de obleas para este proyecto. El tiristor SCR del proyecto de esta tesis con gatillo en la esquina es una versión mejorada de un SCR normal con gatillo en la orilla. El objetivo del experimento es incrementar las áreas de los dedos del gatillo para mejorar la respuesta en di/dt. El SCR de control o normal es el MCR8N, el cual es un SCR de 800 V a 8 A, usando un empaquetado TO-220. El dispositivo del proyecto, que es el del grupo de prueba, es un SCR con el gatillo en la esquina, el cual muestra un área mayor de gatillo

SECCIÓN TRANSVERSAL DEL tiristor TO220 PWR CON SOLDADO DE ALAMBRE

Tamaño del Dado: 84.100.134 v 164 mils

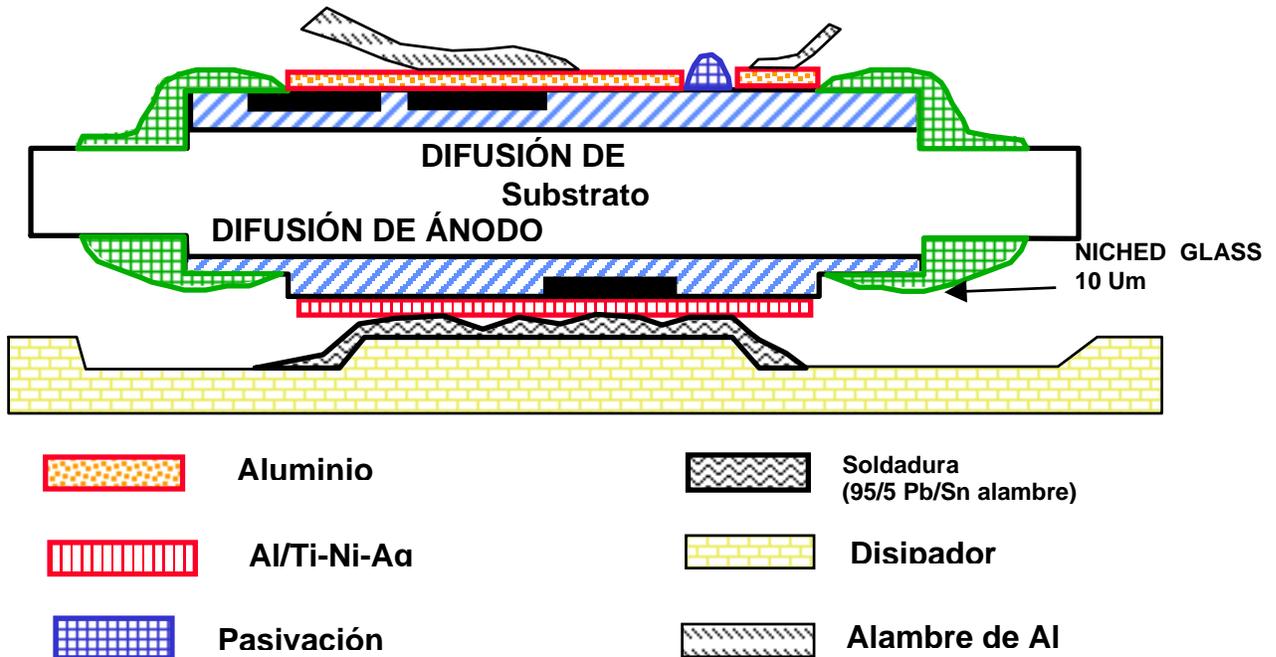


Fig. 2.1 Sección transversal del tiristor TO-220 SCR de potencia.

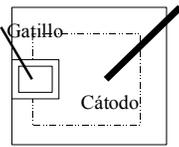
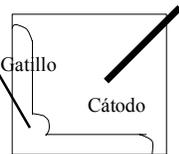
Descripción de Paquete/Mascarillas		
ITEM	Control	Prueba
Dispositivo	MCR8N	MCR8N (mejorado)
Diseño degatillo	Side gate	V-gate (corner gate)
VD max	800 volts	800 volts
Irms max	8 Amps	8 amps
Mask	F25D	F30D
Paquete	TO-220	TO-220
Linea Fuente	TL-608	TL-609
Linea de Dado	DTM3308T	DTM3309T
Tamaño de Dado	100 X 100 mils	100 X 100 mils
Soldado de Alambre	Al (99.99%)	Al (99.99%)
Diámetro de Alambre	K 15 mils G 5 mils	K 15 mils G 5 mils
Preforma	Pb(95%)Sn(5%)	Pb(95%)Sn(5%)
Diagrama de Montaje		
Fotoresistivo o Cátodo	Frente: F25D 01 Dorso: F25D 02	Frente: F30D 21 Dorso: F25D 02
Fotoresistivo Mesa	Frente: F25D 03 Dorso: F25D 04	Frente: F25D 03 Dorso: F25D 04
Fotovidrio	Frente: F25D 05 Dorso: F25D 06	Frente: F30D 25 Dorso: F25D 06
Fotoresistivo o Metales	Frente: F25D 07 Dorso: F25D 08	Frente: F30D 27 Dorso: F25D 08
# SETS	4	4

Tabla 2.1 Resumen de los procesos y comparaciones del grupo de control (tiristor normal con gatillo en la orilla) y el grupo de prueba (tiristor nuevo con gatillo en la esquina), se mencionan también las diferentes mascarillas usadas así como los principales procesos.

Para comparación, este dispositivo es de las mismas características eléctricas que el normal, esto es, a 800V, con una corriente de 8A y mismo empaquetado TO-220, (véase figuras en Tabla 2.1).

El MCR8N de control tiene un diseño degatillo en la orilla y se conoce como *Side Gate*. El nuevo SCR tiene un diseño de gatillo en la esquina y se conoce como *V-Gate* o *Corner Gate*.

Las mascarillas normales utilizadas son las **F25D** para el grupo de control y para el grupo del nuevo dispositivo, que son diferentes, se usaron las **F30D** para diferenciarlas entre sí. El proceso tecnológico usa 4 juegos pares (sets) de mascarillas, por tener este tiristor áreas activas tanto en el frente como en el

dorso. Los juegos se identifican por pares y números del 1 al 8, números impares indican Mascarillas para el frente, y los pares para el dorso, así se tiene la siguiente tabla 2.2, (véase también la tabla 2.1):

Proceso	Grupo de Control		Grupo de Prueba	
	Frente	Dorso	Frente	Dorso
Fotoresistivo de Cátodo	F25D 01	F25D 02	F30D 21	F25D 02
Fotoresistivo de Mesa	F25D 03	F25D 04	F25D 03	F25D 04
Fotovidrio	F25D 05	F25D 06	F30D 25	F25D 06
Fotoresistivo de Metales	F25D 07	F25D 08	F30D 27	F25D 08

Tabla 2.2: Juegos de mascarillas usadas en el experimento; nótese que las notaciones en color rojo del grupo de prueba son las diferentes debido al diseño nuevo degatillo en la esquina.

Se usaron mascarillas con un diseño diferente para el grupo de prueba (gatillo en la esquina) para las operaciones de fotoresistivo de cátodo, fotovidrio y fotoresistivo de metales; estas mascarillas son las que cambian el frente de la oblea.

ON Semiconductor tiene el siguiente flujo general para el proceso tecnológico del silicio: [7]

- 1) Inicio – marcado laser de obleas (Oblea de arranque tipo “n”, baja concentración)
- 2) Medición del espesor de las obleas
- 3) Difusión de gatillo (Boro, BCL3, semiconductor tipo “p”)
 - 3.1) Limpieza
 - 3.2) CVD de Boro (BCL3)
 - 3.3) Set de Boro
 - 3.4) Vapor 700
 - 3.5) Descristalización
 - 3.6) Medición de Resistividad (RSG1)
 - 3.7) Penetración de Boro (Horno de Difusión)
 - 3.8) Medición de Óxido de gatillo (TOX)
 - 3.9) Dummy de Evaluación (Medición de Resistividad)
- 4) Fotoresistivo de Cátodo (FR= negativo)
 - 4.1) Pre-Horneado
 - 4.2) Girado F(Frente) y D (Dorso)
 - 4.3) Horneado Suave
 - 4.4) Alineación Doble (F/D) (Primer Set de Mascarillas)**
 - 4.4.1) Alineación Frente (Mascarilla Normal en el de control, y Nueva en el de prueba)
 - 4.4.2) Alineación Dorso (Mascarilla Normal en ambos grupos)
 - 4.5) Revelado (F/D)
 - 4.6) Inspección (F/D)
 - 4.7) Horneado Duro
 - 4.8) Grabado de Óxido
 - 4.9) Inspección (F/D)
 - 4.10) Lavado Piraña (15 minutos)
 - 4.11) Inspección (F/D)

- 5) Difusión de Cátodo (fósforo, POCL3, semiconductor tipo “n”)
 - 5.1) Limpieza e Inspección
 - 5.2) Predeposición de POCL3
 - 5.3) Horneado
 - 5.4) Medición de Óxido (TOX)
 - 5.5) Medición de Resistividad (RSK1)
 - 5.6) Limpieza 4:1
 - 5.7) Piraña
 - 5.8) Receta Penetración de Fósforo (PT)
 - 5.9) Penetración de Fósforo (Horno de Difusión)
 - 5.10) Medición de Óxido en Dado (TOX)
 - 5.11) Medición de Óxido en Calle (TOX)
 - 5.12) Medición de Resistividad (RSK2)

- 6) Fotoresistivo de Mesa
 - 6.1) Pre-Horneado
 - 6.2) Girado (F/D)
 - 6.3) Horneado Suave
 - 6.4) Alineación Canon (F/D) (Segundo Set de Mascarillas)**
 - 6.4.1) Alineación Frente (Mascarilla Normal en ambos grupos)
 - 6.4.2) Alineación Dorso (Mascarilla Normal en ambos grupos)
 - 6.5) Revelado (F/D)
 - 6.6) Inspección (F/D)

- 7) Grabado Mesa
 - 7.1) Horneado Duro
 - 7.2) Grabado Óxido 1
 - 7.3) Medición de Óxidos (Calle y Escalón)
 - 7.4) Grabado de Mesa 1
 - 7.5) Secado
 - 7.6) Prehorneado
 - 7.7) Grabado de Óxido 2
 - 7.8) Medición de Óxido (Escalón)
 - 7.9) Grabado de Mesa 2
 - 7.10) Medición de Óxido (Escalón)
 - 7.11) Piraña
 - 7.12) Limpieza RCA
 - 7.13) Inspección
 - 7.14) Medición de Óxido Final en Calle
 - 7.15) Medición de Óxido Final en Escalón

- 8) Fotovidriado
 - 8.1) Pre-Horneado
 - 8.2) Girado (F/D)
 - 8.3) Alineación Canon (F/D) (Tercer Set de Mascarillas)**
 - 8.3.1) Alineación Frente (Mascarilla Normal en el de control, y Nueva en el de prueba)
 - 8.3.2) Alineación Dorso (Mascarilla Normal en ambos grupos)
 - 8.4) Horneado Suave

- 8.5) Revelado (F/D)
- 8.6) Inspección (F/D)
- 8.7) Quemado de Resina
- 8.8) Quemado de Vidrio
- 8.9) Inspección Visual
- 8.10) Medición de Voltaje

- 9) Evaporación Aluminio (F/D)
 - 9.1) Limpieza e Inspección
 - 9.2) Evaporación Frente
 - 9.3) Evaporación Dorso
 - 9.4) Limpieza
 - 9.5) Evaporación Ti, Ni, Ag (Dorso)

- 10) Fotoresistivo de Metales
 - 10.1) Horneado Suave
 - 10.2) Girado F(Frente) y D (Dorso)
 - 10.3) Horneado Suave
 - 10.4) Alineación Doble (F/D) (Cuarto Set de Mascarillas)**
 - 10.4.1) Alineación Frente (Mascarilla Normal en el de control, y Nueva en el de prueba)
 - 10.4.2) Alineación Dorso (Mascarilla Normal en ambos grupos)
 - 10.5) Revelado (F/D)
 - 10.6) Inspección (F/D)
 - 10.7) Horneado Duro
 - 10.8) Grabado de Ti, Ni y Ag Dorso
 - 10.9) Grabado Al (5 micras)
 - 10.10) Inspección (F/D)

- 11) Sinterizado y Clasificación
 - 11.1) Sinterizado
 - 11.2) Class
 - 11.3) Inspección

- 12) Prueba y Envío
 - 12.1) Prueba de unidades
 - 12.2) Inspección Visual
 - 12.3) Empaque
 - 12.4) Envío

2.3 Definición de variables de entrada y salida. [5,7,10]

A) Variables de entrada:

1) Tiempo de difusión de cátodo:

La variable principal de entrada fue la variación del tiempo de difusión de cátodo, con tres tiempos diferentes de penetración, enfocados a construir tres lotes de prueba de obleas cada uno, para facilitar los procesos de calificación posteriores.

Los tiempos usados fueron:

T1 170 minutos (tiempo normal)
T2 150 minutos
T3 120 minutos

Estos tres tiempos diferentes son tres recetas usadas en el área de obleas tiristores.

2) Enmascaramiento del frente:

La segunda variable de entrada fue la modificación de los procesos de:

- a) Fotoresistivo de cátodo
- b) Fotoresistivo de vidrio
- c) Fotoresistivo de metales

Utilizando una nueva mascarilla especial con el diseño de gatillo en la orilla.

B) Variables de salida: [5,7,10]

Las variables de salida principales son:

1) Variables Estaticas:

I_{DRM}, V_{DRM}
 I_{RRM}, V_{RRM}
 I_{GT}, V_{GT}
 I_H, V_H

2) Variables dinámicas:

di/dt
 dv/dt

2.4 Bases de diseño : [2,3,5,7,10,11]

Fundamentos de diseño de los tiristores:

Los tiristores pueden hacerse de silicio, germanio, y arsenuro de galio, aunque el más popular es el silicio. Son menos comunes encontrar de arsenuro de galio debido a la tecnología y lo caro de los procesos.

A continuación se enumeran los pasos para hacer el diseño.

1.- Seleccionar el Semiconductor

Se tienen la posibilidad de usar silicio, germanio y arsenuro de galio. El más recomendable es el silicio.

2.- Seleccionar el tipo de dopado

Está muy generalizado iniciar el tiristor con una oblea de silicio tipo n, usando para el dopado fósforo o galio, la oblea tipo n es debido a varias propiedades que se verán en detalle más adelante.

3.- Seleccionar la orientación del cristal con respecto a la estructuración del dopado.

La diferencia de las orientaciones (100) y (111) con respecto a la tecnología de fabricación dan un impacto importante para la elaboración de los tiristores.

4.- Seleccionar el nivel del dopado y el grosor del material inicial.

Para el silicio se prefiere medir la resistividad que es más fácil de medir que el nivel del dopado.

En la tabla 2.3 se da la relación de las principales propiedades físicas de los semiconductores y su efecto en la manufactura de tiristores. Estas afectan el desempeño eléctrico y térmico de los dispositivos y es muy importante tenerlas en cuenta para la selección del semiconductor y de los procesos tecnológicos.

Propiedad del semiconductor	Deseable	Efecto en el tiristor	Deseable
Tiempo de vida de portadores minoritarios	Alto	Voltaje de encendido	Bajo
Movilidad de electrones	Baja	Resistencia de encendido	Alta
Movilidad de electrones	Baja	Caída de voltaje de encendido	Alta
Movilidad de huecos			
Conductividad térmica			
Concentración intrínseca	Baja	Voltaje máximo de avalancha	Alto
Ancho de la banda	Alto	Corriente de fuga	Baja
Punto de fusión	Alto	Capacidad de hacer uniones profundas por difusión	Difusiones profundas

Tabla 2.3 Relaciones importantes de las propiedades físicas con las variables principales del tiristor.

2.4.1. Estructuras de SCR [2,5,7,10]

Se tienen varios diseños de geometrías para los tiristores y se verán las bases del diseño del SCR con gatillo central y los cambios que motivaron el diseño propuesto.

A) SCR tradicional conocido como *gatillo en el centro*:

Al tener el gatillo en el centro tenemos 360° de posibilidad de propagación del plasma de corriente. Se tienen dos difusiones importantes, la difusión “p” que constituye al gatillo, y la difusión “n” que constituye al cátodo. Véase la figura 2.2.

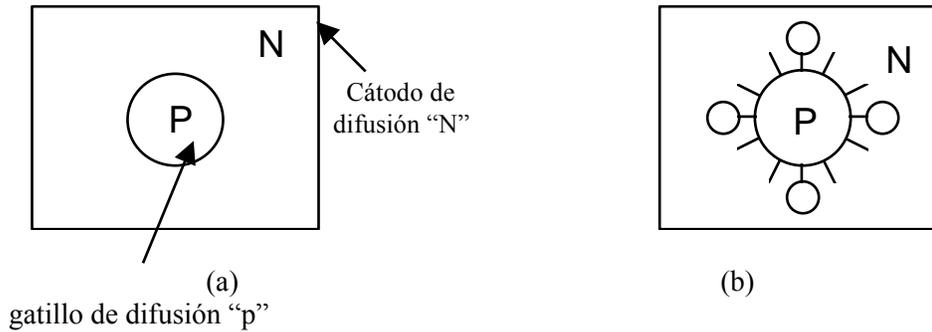


Fig. 2.2. Diferentes diseños para SCR's con gatillo al centro, a) sin puntos de corto y b) con puntos de corto.

Para lograr que la difusión “n” se encienda o entre en estado de conducción, se ocupa el uso de puntos de cortos o centros de corto de material “p” distribuidos en el área del cátodo (figura 2.2 (b)). Si se hace un corte transversal de la figura 2.2. (a) y 2.2.(b), se obtienen las figura 2.3.(a) y 2.3.(b). Si consideramos que hay dos áreas importantes en la geometría superior (máscara), el área de difusión de cátodo y el área de difusión de gatillo, y que la separación entre una y otra es a través de un óxido, y que posteriormente estas áreas son cubiertas con metal para hacer las áreas de contactos.

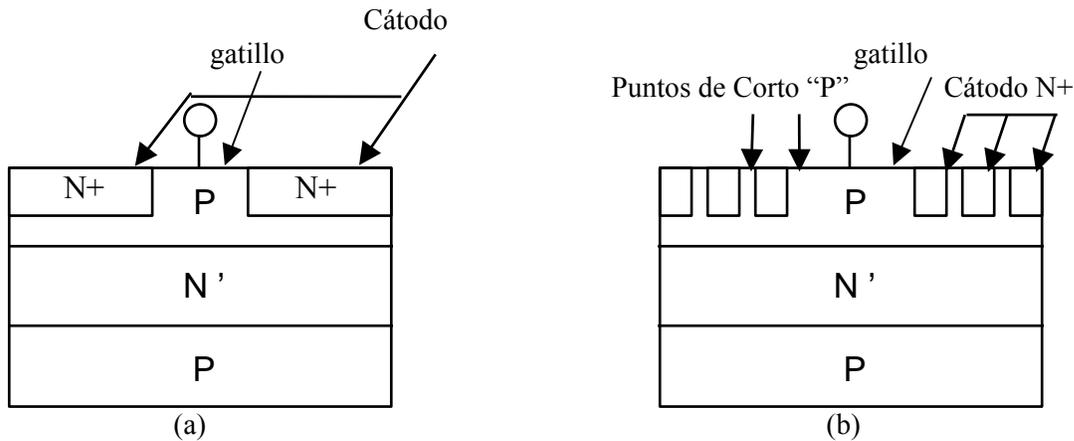


Fig. 2.3. Sección transversal de los SCR's de la figura 2.2, a) sin puntos de corto y b) con puntos de corto.

En la figura 2.4 se muestra la influencia que tienen los puntos de corto en I_{gt} e I_H en el diseño y funcionamiento de los tiristores. De ahí se puede apreciar que entre mayor cantidad de puntos de cortos se tengan mayor es la corriente, así como que la relación I_H/I_{gt} se acerca a la unidad, lo que indica una mayor estabilidad en el dispositivo.

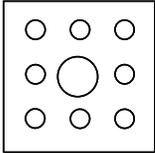
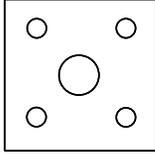
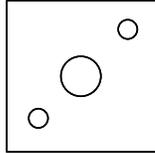
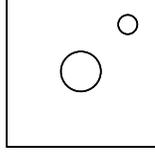
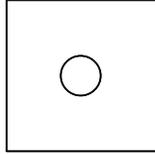
		<u>Igt(mA)</u>	<u>IH(mA)</u>	<u>IH/IGHT</u>
PATRONES		8.07	8.21	1.01
		5.11	6.04	1.18
		3.00	3.15	1.05
		1.54	2.30	1.5
		.25	-	-

Fig 2.4 Influencia de puntos de corto en los tiristores.

En la figura 2.5, se muestran estas áreas. Aproximadamente la separación de las áreas de cátodo y gatillo se tienen a la mitad del anillo de óxido que rodea al gatillo. Esta es la separación física de un electrodo de otro. Tecnológicamente se tiene el inicio de la difusión de cátodo, en el límite de la terminación de la difusión de gatillo bajo la mitad del anillo de óxido.

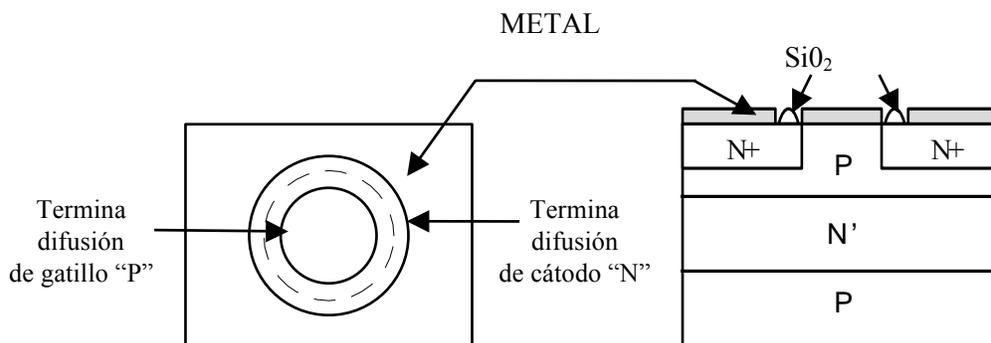


Figura 2.5 Difusiones "p" y "n".

El diámetro de estas áreas definen un parámetro muy importante para el diseño, conocido como “frente de gatillo-cátodo”, que aquí se designará como “ F_{GK} ” y es igual a $F_{GK} = \pi D$, donde “ D ” es el diámetro del toroide que define el inicio de la difusión de cátodo y fin de la de gatillo (límites). Véase la figura 2.6.

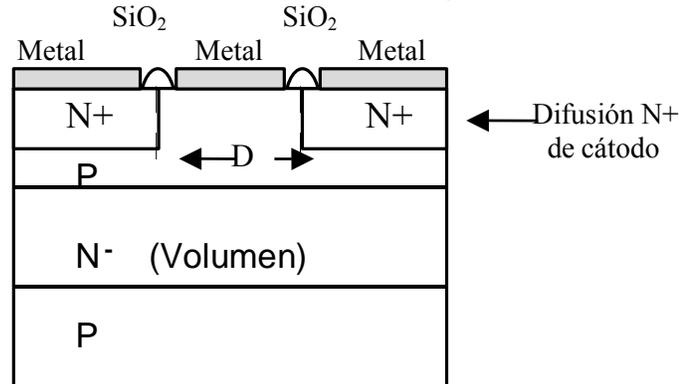


Figura 2.6. Límites de las difusiones.

Se define entonces una región de control que circunda al gatillo y se deberá definir después cómo se controla, y el diseñador debe trabajar en las dimensiones para que cuando circule la corriente, se disipe en dichas áreas. Se tiene entonces una región de control que es el propio gatillo, que está localizada en la periferia del mismo, definida por el parámetro F_{GK} , y finalmente una de conducción o disipación de corriente.

Otro parámetro importante es el “ di/dt ” para la densidad de corriente. Este parámetro representa la variación instantánea de la corriente respecto al tiempo, la cual es matemáticamente la derivada de la función de corriente $i(t)$ respecto al tiempo.

La di/dt tiene las siguientes consideraciones:

- La corriente de entrada cambia rápidamente respecto al tiempo,
- En cada punto se define una cantidad de corriente,
- La corriente es instantánea (denotada con la letra minúscula “ i ”),
- La densidad de corriente es una función de la geometría del tiristor.

Se definen las profundidades de las uniones del gatillo y del cátodo como, X_{JG} y X_{JK} respectivamente, de acuerdo a las distancias mostradas en la figura 2.7, y a su diferencia se le llamará “región de transición”, igual a X_T . El diámetro “ D ” del gatillo determina la densidad de corriente (J) y es uno de los parámetros más importantes de diseño.

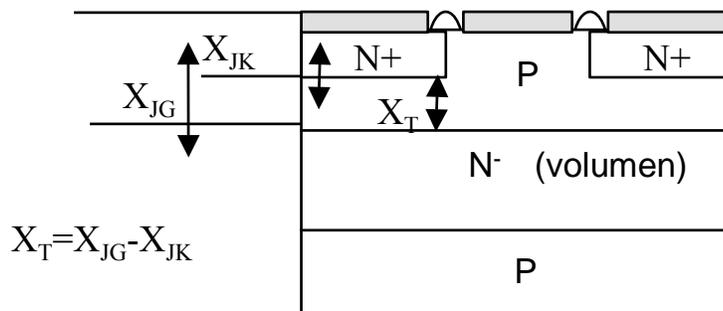


Figura 2.7. Uniones del tiristor.

Entonces, $X_T = X_{JG} - X_{JK}$, por lo tanto

si

$$J = \frac{i}{A}$$

donde: J = densidad de corriente,
 i = corriente instantánea,
 A = área de la sección transversal.

y haciendo $A = F_{GK} X_T = \pi D X_T$, obtenemos una relacion importante para el diseño:

$$J = \frac{i}{A} = \frac{i}{\pi D X_T} \quad (2.1)$$

Esta ecuación tendría una representación gráfica sencilla, veáse fig. 2.8, y es un área difusora de corriente que presenta un frente de propagación de 360° para una cierta densidad de corriente. El área difusora es prácticamente la región de transición (X_T).

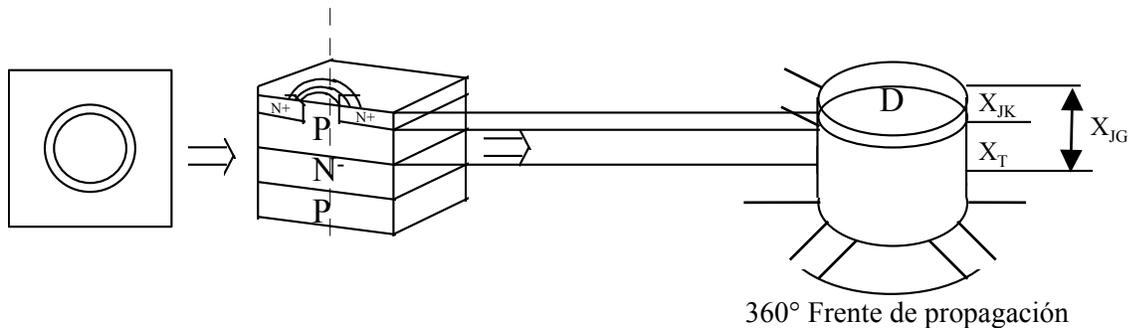


Figura 2.8. Regiones de difusión.

La densidad de corriente (J) es muy importante para el funcionamiento del dispositivo. La capacidad de manejar corriente tiene que ver con las dimensiones geométricas del gatillo y del cátodo. Parece ser que la solución, a primera vista sería tener un gatillo de gran profundidad (X_{JG}) y de gran diámetro (D), para poder dispersar y conducir más corriente a través del cátodo, pero según la ecuación (2.1), se tendría que la densidad de corriente a manejar sería pequeña. Al tener poca capacidad de manejar altas densidades de corriente se tendría una concentración de alta corriente, y también el área de silicio disponible para el cátodo se reduciría y esto conduciría a problemas de disipación de calor. Para el caso contrario, si se usaran gatillos de dimensiones pequeñas (D y X_{JG}), se podría manejar altas densidades de corrientes pero esto podría hacer que existieran concentraciones de altas corrientes provocando que el tiristor se calentara en forma excesiva. Estos centros se conocen como puntos calientes y en un momento dado llevarían al dispositivo a modo de fallas del tipo térmicos, por lo tanto para el diseño se trabajaría con un término intermedio dependiendo de los requerimientos de trabajo del dispositivo.

Esto se resume en la siguiente tabla:

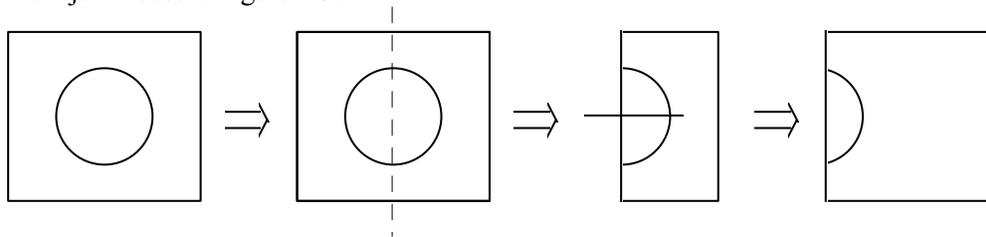
$D \ll$	$J \gg$	Se concentra y produce calentamientos en los dispositivos.
$D \gg$	$J \ll$	Se desperdicia silicio en el cátodo y la cantidad de corriente disminuye.

Al momento en que se dispersa la corriente instantánea (i), no se sabe de qué tamaño es la densidad de corriente (J) en el cátodo, y el plasma puede no expandirse y dar problemas de manejo de capacidad de corriente en el cátodo.

La densidad de corriente (J) depende de las dimensiones del gatillo (D), y la combinación de J y D trascienden en la aplicación del tiristor. Estos pueden provocar puntos calientes en la estructura y provocar fallos por efectos térmicos desencadenados.

B) SCR con gatillo en la orilla: [5,7,10]

Ahora se comentará acerca de la estructura en la cual el gatillo no está en el centro, sino a un lado. Partiendo de la estructura del SCR con gatillo en el centro, se tiene una nueva estructura si se divide éste por la mitad, y se balancea el silicio restante para darle la dimensión, de acuerdo a la potencia y corriente a manejar. Véase la figura 2.9.



Gatillo en el centro. Se divide por la mitad.

Nuevo concepto
“gatillo a un lado”.

Se aumentan las
dimensiones para
balancear el silicio y
manejo de corriente
(gatillo a un lado).

Fig. 2.9. Origen del concepto de la estructura degatillo a un lado.

En este diseño se tiene una posibilidad de propagación de plasma de 180° . Si se parte de que $F_{GK} = \pi D$ para el centro, tendremos ahora $F_{GKS} = \pi D/2$. Al tener este diseño, el diámetro se divide entre dos, haciendo que la capacidad promedio de manejo de densidad de corriente aumente en un factor de dos, de acuerdo a la ecuación 2.1. El di/dt es menor. Una característica importante es que para la conexión de los electrodos, se usa soldado de alambre de aluminio, el cual presenta un flujo de densidad de corriente limitado y el desempeño térmico no es muy bueno, debido a que el área de cátodo que se presenta para la disipación de potencia es menor. El SCR tradicional con gatillo en el centro se conecta usando clips metálicos que soportan el flujo de altas densidades de corriente.

C) SCR con gatillo en la esquina en forma de “V”(diseño propuesto): [5,7,10]

Este diseño surge con el concepto de dividir entre 4 a la estructura de un SCR con gatillo en el centro. Similarmente al caso anterior, todas las fórmulas se van a la cuarta parte. La capacidad de manejar corriente se aumenta en un factor de 4. El frente de propagación de plasma es de 90° y es también un dispositivo de soldado de alambre (véase figura 2.10). El diseño lleva un aumento de dimensiones para compensar el silicio y el manejo de potencia.

La fórmula de frente de gatillo-cátodo será: $F_{GKV} = \pi D/4$. Esta es la estructura que se usará para la construcción del dispositivo en cuestión de esta tesis.

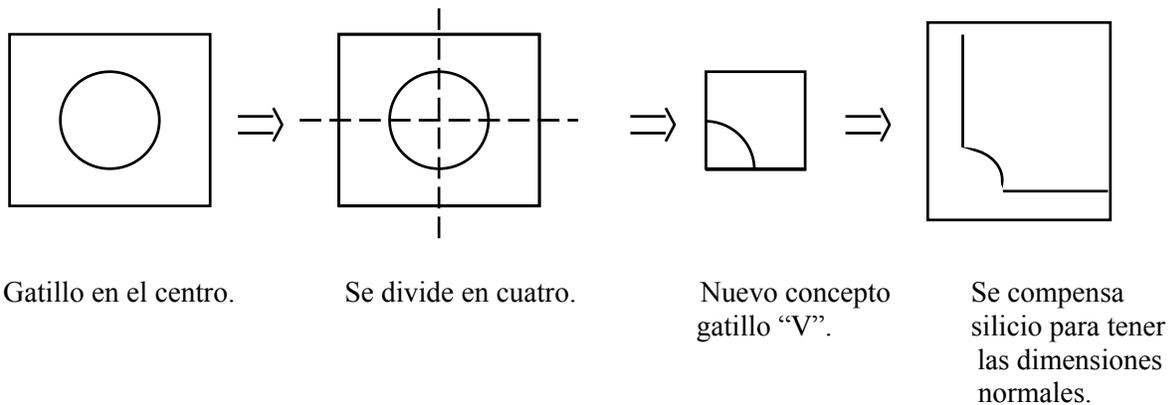


Fig. 2.10. Origen del concepto de la estructura del SCR con gatillo en la esquina "V".

2.4.2 Conceptos y bases de diseño: [2,3,5,7,10,12,13,14]

¿Cómo completar o cómo balancear el efecto de $F_{GK} = \pi D$ al pasar de una estructura a otra?, esto es ¿ F_{GK} a F_{GKS} o a F_{GKV} ?, la respuesta a esta pregunta fue la que permitió hacer posible la realización de otros diseños con la posición del gatillo diferente al centro en las geometrías de los tiristores. Otro factor importante a considerar es la distribución de cortes alrededor del gatillo, éstos deben cambiar y ajustarse a ciertas reglas para lograr los requerimientos de diseño.

Estos diseños permitieron pasar de procesos de manufactura donde se usaban "clips" de cobre a los clips con soldado de alambre (cierta aleación de aluminio y magnesio). Lo que representó pasar de procesos manuales a procesos automáticos permitiendo reducir costos de manufactura, lo cual es un factor importante dentro del proceso de producción de toda fábrica.

Una forma de balancear los efectos de $F_{GK} = \pi D$, fue la idea de agregar brazos a los nuevos conceptos de gatillo y así tener áreas de compensación que ayuden al gatillo en la disminución del área; esta idea está representada en la figura 2.11. Se hacen consideraciones geométricas, las cuales afectan los cálculos, y éstas afectan las fórmulas matemáticas usadas para los diferentes tipos de gatillo.

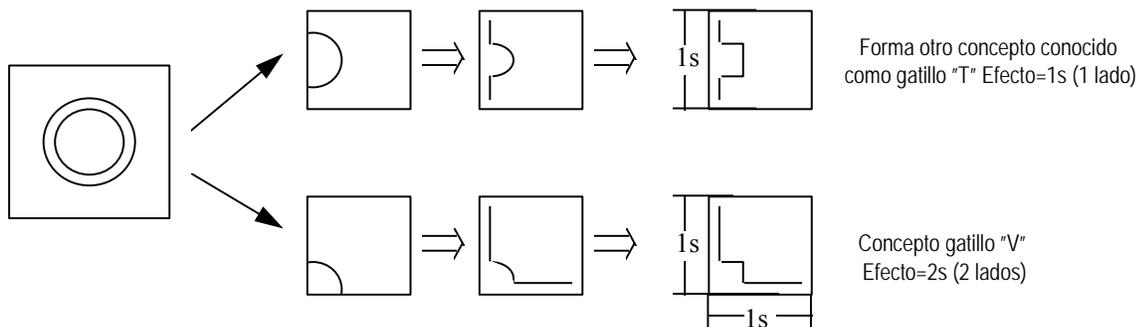


figura 2.11. Ideas para balancear el efecto $F_{GK} = \pi D$.

La distribución de los puntos de cortes permitirán reducir la sensibilidad del dispositivo a encendidos indeseables y regular el dv/dt . Introduciendo los puntos de cortes, el orden de magnitud de I_h cambia de μA a mA . Estos son al mismo tiempo una protección para el dv/dt . Los puntos de cortes presentan un campo de acción el cual se conoce como "círculo de protección de dv/dt ". Estos no son infinitos y no existen físicamente en la mascarilla, son solamente conceptuales. El cálculo teórico de los mismos está en

función de la resistencia transversal r_{bb} del gatillo. Se definirán algunos conceptos útiles partiendo de las figuras 2.12 y 2.13.

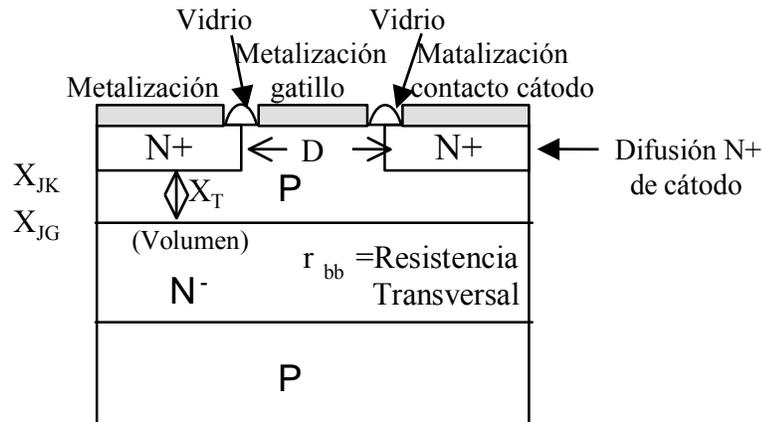


Figura 2.12. Metalizaciones de la estructura con gatillo en el centro y r_{bb} .

La metalización del cátodo en la estructura del gatillo en el centro se hace en dos pasos de evaporación: el primero es de Al, y el segundo es la evaporación de Ti, Ni y Ag.

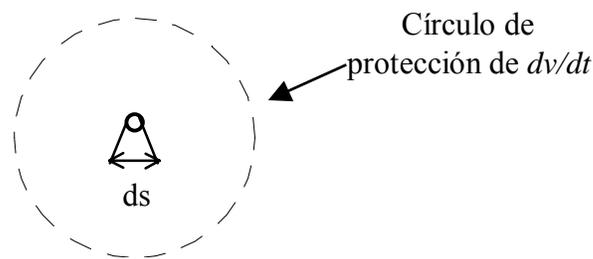


Figura 2.13. Puntos de corto.

d_s = diámetro del corto.

Círculo de protección = $f(r_{bb})$.

Los puntos de corto se distribuyen en el cátodo tratando de cubrir una mayor área y considerando el alcance de estos círculos de protección.

r_{bb} es la resistencia transversal que presenta la región de transición (X_T). A mayor profundidad en la difusión de cátodo (X_{JK}), X_T disminuye y por lo tanto también el área de la sección transversal, haciendo que la r_{bb} aumente. r_{bb} es la resistencia de hoja o de cuadro.

Se cumplen las siguientes relaciones: $> X_{JK} < X_T > r_{bb}$

También con la variación de r_{bb} se tiene una variación de la capacitancia inherente a la región de transición (X_T). Esto es, al disminuir X_T , la capacitancia de la región transversal aumenta (disminuye la distancia ($X_{JG} - X_{JK}$)). Aquí es donde entran los puntos de corto para balancear estas variaciones, cuando se presenta una alta variación de dv/dt , los puntos de corto provocan una caída de potencial, disminuyendo el

impacto de dv/dt , y éste se limita con la r_{bb} , es decir, la r_{bb} determina la capacidad de poder controlar el dv/dt y al mismo tiempo la potencia a manejar por el dispositivo.

El principal efecto de la r_{bb} es en la I_{GT} . Se ha demostrado que existe una relación inversamente proporcional entre ambas, es decir, $I_{GT} \propto 1/r_{bb}$.

Generalmente la r_{bb} se garantiza a 100 °C.

Ahora se presenta el concepto de corriente inducida debido al efecto de dv/dt y a la capacitancia de la estructura inherente al silicio formada por la región de transición; estos factores combinados originan una corriente inducida (i_{in}), dada por:

$$i_{in} \propto C * dv/dt \quad (2.2)$$

Esta corriente inducida se da en la estructura transversal, y debe ser menor que la I_{GT} , para evitar que el tiristor se encienda indeseablemente. Se garantiza una condición de voltaje inducido para una $T = 125$ °C para el diseño y aplicación del tiristor menor a 0.55 volts. Este valor es usado para calcular la r_{bb} , y esta r_{bb} determina los círculos de protección de dv/dt , y a la vez está relacionada con X_{JG} y X_{JK} y en consecuencia con X_T .

Aquí se considera que el dv/dt es capaz de generar un voltaje inducido y este se acota a un valor máximo de 0.55 volts.

Los puntos de corto se distribuyen en el área de cátodo considerando el espaciamiento debido a los círculos de protección. Hay arreglos de los mismos en forma hexagonal, pentagonal, cuadrangular, etc. Véase la figura 2.14, como ejemplo.

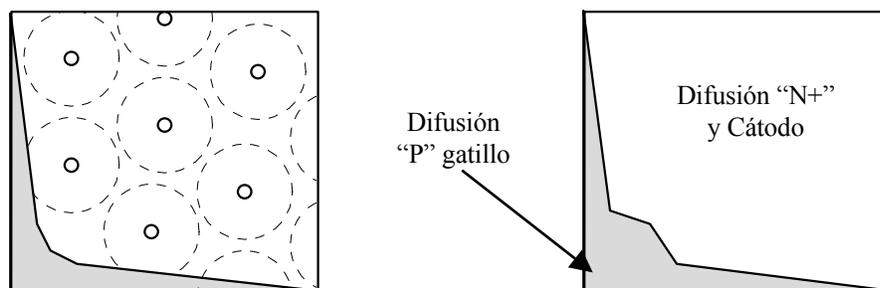


Figura 2.14. Ejemplo de distribución de cortos.

Otra diferencia que se debe considerar entre la estructura de gatillo en el centro y los otros diseños es la metalización de cátodo. En el diseño tradicional (gatillo en el centro), ésta se lleva a cabo en dos pasos de evaporación, en el primero se evapora Al, y en el segundo paso, el resto de los metales Ti-Ni-Ag, mientras que en otros diseños (gatillo en el lado, y en la esquina), llevan sólo un paso, en el cual se evapora Al, porque normalmente son para dispositivos con soldado de alambre.

Resumen:

En este capítulo se revisaron principalmente las bases para la definición de los grupos de esta tesis, mostrando que se va a trabajar con un total de 4 grupos de obleas, y las principales variables de entrada y salida. Se trabajaron diferentes tiempos de penetración de cátodo, manteniendo los conjuntos de mascarillas iguales para el dorso, y variando solo unas cuantas por el frente. Se mencionaron las principales tecnológicas de una fábrica de obleas. Se vieron las bases para el diseño y el origen del concepto de diseño de gatillo en la esquina así como los principales efectos de los cortos y su importancia.

CAPITULO 3

Condiciones de diseño y fabricación de los tiristores: caracterización física y eléctrica.

Introducción:

En este capítulo se verán las diferencias entre los grupos de control y prueba, así como los corridos que se generaron en el proceso tecnológico del área de obleas. Se establecen las principales pruebas eléctricas del grupo de control, el cual servirá como comparación a los grupos de prueba. Dentro de los procesos tecnológicos se verán las principales operaciones que son más relevantes para este proyecto; como el proceso de mascarillas para el frente del grupo de prueba. Se verán fotos a detalles de obleas tanto del grupo de control como de prueba de los dados construidos en esta tesis, así como de microsecciones de los dados para ver los detalles de las uniones y cortos. Se cubrirá la parte de la caracterización eléctrica en el área de obleas.

3.1. Definición del experimento. [5,7,10]

El objetivo del experimento, es demostrar que el mejoramiento del dv/dt está relacionado con la I_{gr} de los tiristores y por ende de las áreas de los gatillos en los diferentes diseños.

Esta tesis tiene como objetivo la construcción de un SCR con alta capacidad de conmutación. Los diseños de los tiristores en ON Semiconductors para el paquete de TO-220 (vease fig. 3.1) para tecnologías de SCR y TRIAC son tres: gatillo en el centro que es el tradicional; gatillo en la orilla, que normalmente es el de uso más común después del gatillo en el centro; y este nuevo que es el que se está manejando en este proyecto con gatillo en la esquina. En la figura 3.2 se encuentran los diferentes tipos de gatillo en tiristores.

El experimento consistió en diseñar y construir obleas de silicio en la fábrica de obleas de ON Semiconductor. Durante el proceso de justificación del proyecto ante la gerencia, fueron conseguidas para la realización de este proyecto las debidas autorizaciones. La construcción de este dispositivo mostró ventajas competitivas en el portafolio de productos de tiristores de ON Semiconductor.

Para el experimento se usaron 24 obleas recibidas con la difusión de cátodo (oblea tipo N) ya hecha por el proveedor de obleas. El proveedor fue *Komatsu Electronic Metals Co. Ltd.* de Japón. Las características principales de estas obleas son:

- a) Cantidad: 24 Obleas de silicio de alta pureza
- b) Especificación: AH52530K
- c) No de parte: P32COOKO
- d) Lote no: AH5253K-X8-501 8/8
- e) Diámetro: 75.69 – 76.71 mm
- f) Grosor: 216.0 – 241.0 micras
- g) Acabado: pulido brillante
- h) Tipo de semiconductor: dopado tipo N
- i) Tipo de proceso de construcción: Zona Flotante
- j) Resistividad: 50.0 – 70.0 ohm-cm

- k) Tiempo de vida de portadores: $> 50 \mu\text{sec}$
 - l) Concentración (Etch Pit Defect): $> 0.500 \times 10^3 / \text{cm}^2$
 - m) Orientación: (111) $0^\circ \pm 2^\circ$
- Angulo de corte para los flats: (110) 15° 19.1-25.4 cm, 45° 9.6-12.6 cm

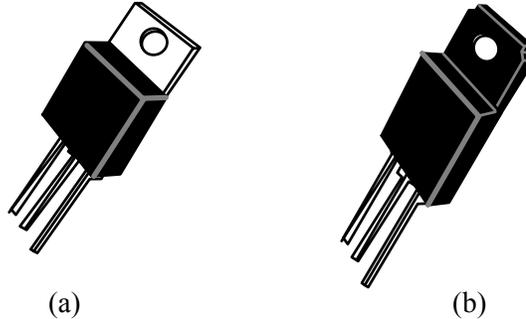


Fig. 3.1 Paquetes de TO-220: a) normal, b) aislado

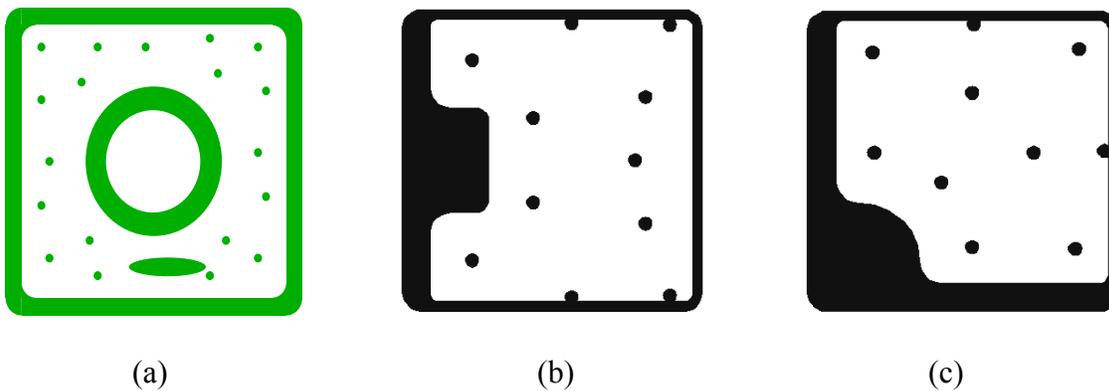


Fig. 3.2 Diferentes diseños de gatillos para SCR. (a) gatillo en el centro (center gate); (b) gatillo en la orilla (side gate); (c) gatillo en la esquina (corner gate).

Los dados en las áreas de obleas tienen un nombre para identificarlos, a esto se le conoce como dados de los números de parte **DTM3308T** para el grupo de control y **DTM3309T** para los grupos de prueba. Este es el nombre que se usa para identificar este producto a lo largo de toda el área de obleas, para un lote determinado. En las áreas de ensambles finales (“back-end”), este dado recibe un nombre o número de parte como **TL-608** para el grupo de control, y **TL-609** para los grupos de prueba. En las áreas de prueba eléctrica final estos dados reciben un nombre más relacionado con el nombre del dispositivo final, para el caso que aplica es el **MCR8**. Este es el nombre con el que se le conoce en forma comercial agregando una letra para definir el nivel del voltaje del dispositivo. El voltaje seleccionado fue el de **800 V**, que es la letra “**n**” (**MCR8N**).

Durante el proceso se variaron:

- 1) Tiempo de penetración en la difusión de cátodo,
- 2) Cambio de mascarillas del frente para generar el diseño del gatillo en la esquina.
- 3) Las obleas construídas se procesaron con tiempos diferentes de penetración de cátodo y enmascaramiento del frente diferente en sus respectivas operaciones.
- 4) En los procesos de enmascaramiento del frente para las operaciones de fotoresistivo de cátodo, fotovidrio y metales se usó una nueva mascarilla hecha con el concepto de gatillo en la esquina. Estas mascarillas se mandaron construir especialmente para esta tesis.

3.2 Grupos de corridos de fabricación de obleas. [3,5,7,10]

Se formaron 4 grupos de construcción de obleas: Un grupo de control, para tener referencia en todos los procesos y poder hacer la evaluación comparativa, y mostrar que el nuevo diseño es mejor o igual que los productos con gatillo en la orilla; a éste se le denominó **C**. Tres grupos de prueba, en los cuales su variación fue la de diferentes tiempos en penetración de cátodo, para ver diferencias en el proceso tecnológico de obleas, denominados T1 (es el tiempo normal de penetración de cátodo), T2 (es un tiempo menor pero usado en producción), y T3 (es un tiempo aún menor). Véase la tabla 3.1 como referencia.

Los tiempos son: Normal/T1: 170 min, T2: 150 min, T3: 120 min.

Grupos a procesar:		
Grupo	Proceso	Obleas
Control	Normal	6 Obleas
Prueba	T1	6 Obleas
	T2	6 Obleas
	T3	6 Obleas
	Total	24 Obleas

Tabla 3.1. Grupos de obleas a procesar.

3.3 Identificación de las obleas dentro de los grupos de cada oblea.

En la tabla 3.2 se encuentra la identificación que se usó para cada oblea dentro de los grupos. Se tienen un total de 24 obleas. En cuatro grupos, se usaron 6 obleas en cada grupo. Se identificaron en forma aleatoria. Tres obleas fueron rotas en el proceso. En lo posible se trató de procesar las obleas al mismo tiempo para tener las mismas condiciones de proceso y evitar en lo posible afectar las condiciones que pudieran variar los resultados del experimento.

Identificación de Obleas:			
	Grupos	Identificación de Obleas	Total
Control	Normal	1, 2, 5, 7, 8, 9	6 Obleas
Prueba	T1	3, 13, 17, 18, 20, 23	6 Obleas
	T2	4, 11, 12, 14, 21, 22	6 Obleas
	T3	6, 10, 15, 16, 19, 24	6 Obleas
Total			24 Obleas

Nota: las siguientes obleas se rompieron durante el proceso la 18, 22, 23

Tabla 3.2. Identificación de las obleas dentro de cada grupo.

En cada grupo de obleas se identificarán las corridas y los procesos por los cuales tenían que pasar.

En la tabla 3.3 se pueden ver los diferentes procesos tecnológicos, así como los cambios de cada proceso para cada grupo, ya sea de control o de prueba.

Descripción de Corridos y Lotes

	Cambios	Control	Prueba	Comentarios:
Inicio	Ninguno	6 Obleas	T1 6 Obleas	1 corrido 1 lote
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	
Difusión de Gatillo	Ninguno	6 Obleas	T1 6 Obleas	1 corrido 1 lote
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	
Fotoresistivo de Cátodo	Cambio de mascarilla frente F25D 01 a F30D 21	6 Obleas	T1 6 Obleas	1 corrido 1 lote
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	
Difusión Cátodo	T2 tiempo normal T1 > T2 (ya usado) T3 < T2 (ya usado)	6 Obleas	T1 6 Obleas	3 corridos 3 lotes
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	
Fotoresistivo de Mesa	Ninguno	6 Obleas	T1 6 Obleas	1 corrido 1 lote
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	
Grabado de Mesa	Ninguno	6 Obleas	T1 6 Obleas	1 corrido 1 lote
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	
Fotovidriado	Cambio de mascarilla frente F25D 05 a F30D 25	6 Obleas	T1 6 Obleas	1 corrido 1 lote
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	
Evaporación de Aluminio Frente y Dorso	Ninguno	6 Obleas	T1 6 Obleas	1 corrido 1 lote
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	
Evaporación de Titanio, Niquel y Plata (Dorso)	Ninguno	6 Obleas	T1 6 Obleas	1 corrido 1 lote
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	
Fotoresistivo de Metales	Cambio de mascarilla frente F25D 07 a F30D 27	6 Obleas	T1 6 Obleas	1 corrido 1 lote
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	
Sinterizado y Clasificación	Ninguno	6 Obleas	T1 6 Obleas	1 corrido 1 lote
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	
Prueba y Envío	Prueba separada de cada grupo (4 en total)	6 Obleas	T1 6 Obleas	1 corrido 1 lote
			T2 6 Obleas	
			T3 6 Obleas	

Tabla 3.3. Descripción de cada proceso y variantes de grupos de control y prueba. Definición de los grupos del experimento y variaciones para formar los nuevos datos.

3.4 Parámetros eléctricos del grupo de control de prueba.

Con la finalidad de tener una referencia de comparación para nuestro grupo prototipo, a continuación se establecen los parámetros eléctricos correspondientes al grupo de control y que pertenecen al MCR8N. Estos parámetros son de un tiristor comercial de amplio uso en la industria. Estos parámetros se especifican a continuación en la tabla 3.4.

CONDICIONES ELECTRICAS MCR8N

Secuencia de Prueba	Condiciones	Corner Gate (MCR8N)		V - Gate	
		Min	Max	Min	Max
1	IDRM1 VD = 800V GATE OPEN	--	10 μ A	--	10 μ A
2	IRRM1 VD = 800V GATE OPEN	--	10 μ A	--	10 μ A
3	VGT1 VD = 12 V RL = 100 ?	0.5 V	1.0 V	0.5 V	1.0 V
4	IGT1 VD = 12 V RL = 100 ?	2.0 mA	15 mA	2.0 mA	15 mA
5	IH1 VD = 12 V Gate Open I(int) = 150 mA	4.0 mA	30 mA	4.0 mA	30 mA
6	VTM1 ITM = 16 A(pk) P.W. = 1.0 mSec, D.C. = 2%	--	1.8 V	--	1.8 V
7	IDRM2 TJ = 125°C GATE OPEN VD = 800V	--	2.0 mA	--	2.0 mA
8	IRRM2 TJ = 125°C GATE OPEN VD = 800V	--	2.0 mA	--	2.0 mA
9	VGT2 TJ = 125°C VD = 12 V RL = 10 k?	0.2 V	--	0.2 V	--
10	dv/dt(s) TJ = 125°C; GATE OPEN Exponential waveform VD = 800V	50 V/ μ Sec	--	50 V/ μ Sec	--
11	di/dt(s) TJ = 125°C; GATE OPEN Exponential waveform VD = 800V	?	--	?	--

Tabla 3.4 Parámetros eléctricos de los dispositivos del experimento (48A)

Para asegurarse que la mesa se ha hecho a la profundidad requerida, se utiliza el equipo de medición *Dektak 3 ST*, utilizando el software versión 1.07 para tomar el perfil de la misma. Este se hace tomando un monitor a las obleas semiconductoras.

3.5 Valores esperados en el área de obleas:

Un resumen de los valores límites de los principales procesos tecnológicos para el área de obleas, como son difusión de boro, difusión de fósforo y grabado de mesa, se pueden observar en la siguiente tabla 3.5. En la primera columna se menciona el tipo dispositivo, presentando los que estuvieron construyéndose durante estos 6 meses en el área de obleas los cuales son: DTM3308T para el grupo de control (gatillo en la orilla) y DTM3309T para los grupos de prueba (gatillo en la esquina). El dispositivo nuevo es DTM3309T, se probó utilizando los límites para el DTM3308T variando ligeramente algunos parámetros eléctricos debido al efecto del nuevo diseño en el gatillo.

Esta Tabla 3.5 es extremadamente importante, ya que muestra todos los parámetros para los dispositivos con soldado de alambre que es el que nos ocupa tanto SCR como TRIACS.

La tabla 3.5 enlista los valores esperados en cada proceso de obleas (primera fila); los valores medidos (segunda fila).

Vease la tabla 3.5, donde se encuentran los valores medidos de los principales procesos tecnológicos tomados durante el proyecto.

TABLA DE LIMITES PARA PROCESOS DE TIRISTORES DE SOLDADO DE ALAMBRE

	Dispositivo	Oblea y espesor mils	DIFUSION BORO (BCL3/gatillo)					DIFUSION FOSFORO (POCL3/cátodo)					GRABADO MESA			PU		
			Receta ohm-sq	RSG1 ohm-sq	TOX gatillo Angstrom	Dumm y ohm-sq	RSG2 ohm-sq	TOX PD Angstrom	RSK1 ohm-sq	Receta	TOX dado Angstrom	TOX calle Angstrom	RSK2 ohm-sq	Primer grabado calle micras	Segundo grabado calle micras	Segundo grabado escalón micras	Dado mils	DPP0
Limites	DTM3308T SCR	P32C00 8.5-9.5	31 31+/- 5	29.5-32.6	16-18000	29-33	25-29	4500 +/- 1500	676-725	Whs	>10500	4500-7000	422-462	35-40-45	45-52-69	10-12-14.	100	688
Medidas C, T1	DTM3308/9T SCR	8.75-9.0	31 31+/- 5	30.4	17038	31	27	4576	701	Whs	11374	5867	430	40	53-52.8	10.9-11.2	100	688
Medidas T2	DTM3309T SCR	8.75-9.0	31 31+/- 5	30.22	17038	31	27	4577	701	Wbo	11393	5811	428	40	53-52.8	10.9-11.2	100	688
Medidas T3	DTM3309T SCR	8.75-9.0	31 31+/- 5	30.21	17038	31	27	4577	703	Ags	11596	5952	442	40	53-52.8	10.9-11.2	100	688
								predeposito			penetración							

Tabla 3.5

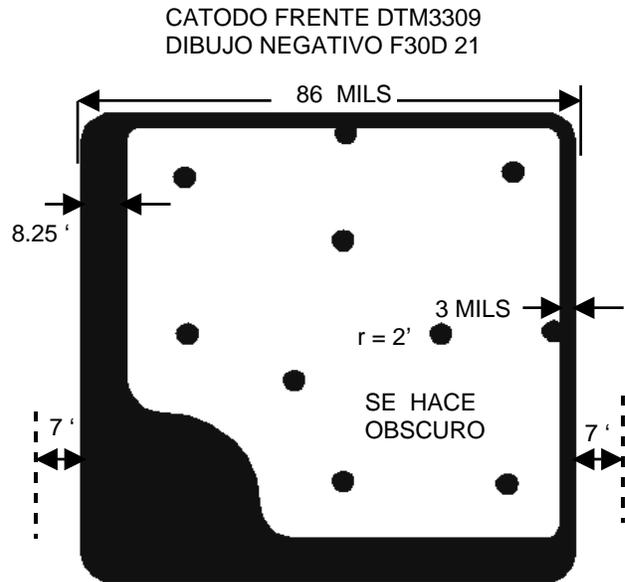
3.6 Fabricación de Mascarillas: [1,3,5,7,9,10,11,13]

Las mascarillas se mandaron construir para el dado que llevaría el gatillo en la esquina. Como ya se mencionó, éstas se denominaron F30D; para el gatillo en la orilla se usaron las mascarillas de producción normal, denominadas F25D. Las mascarillas fueron hechas en cromo duro. Véase la tabla 3.1 y tabla 3.2.

Para el grupo de prueba recordemos que sólo las mascarillas del frente cambian, las del dorso se mantienen igual, y la del frente de Mesa es la misma. Así, sólo cambian frente cátodo F30D 21, frente fotovidrio F30D 25 y frente metales F30D 27, las cuales se muestran en las siguientes figuras y las fotos donde se ven los detalles de las mascarillas utilizadas. En la figura 3.3 se ve la mascarilla para la oblea F30D-21, la cual fue usada para el fotoresistivo de cátodo.



(a)



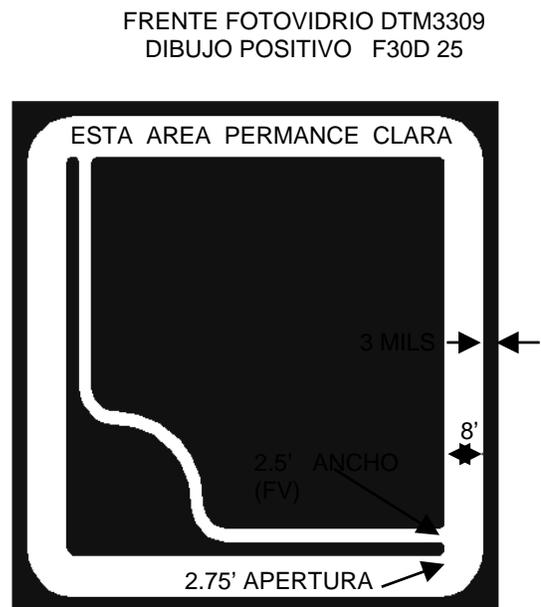
(b)

Fig. 3.3. a) foto de la mascarilla de vidrio F30D-21, b) Mascarilla negativa frente cátodo en su dibujo negativo F30D-21, Fotoresistivo de Cátodo

Esto mismo es para las siguientes figuras, donde se muestran las mascarillas para fotovidrio F30D-25 y fotoresistivo de metales F30D-27.



(a)



(b)

Fig. 3.4. a) foto mascarilla F30D-25, Fotovidrio, fuera de la caja de protección. b) Mascarilla positiva frente fotovidrio F30D-25

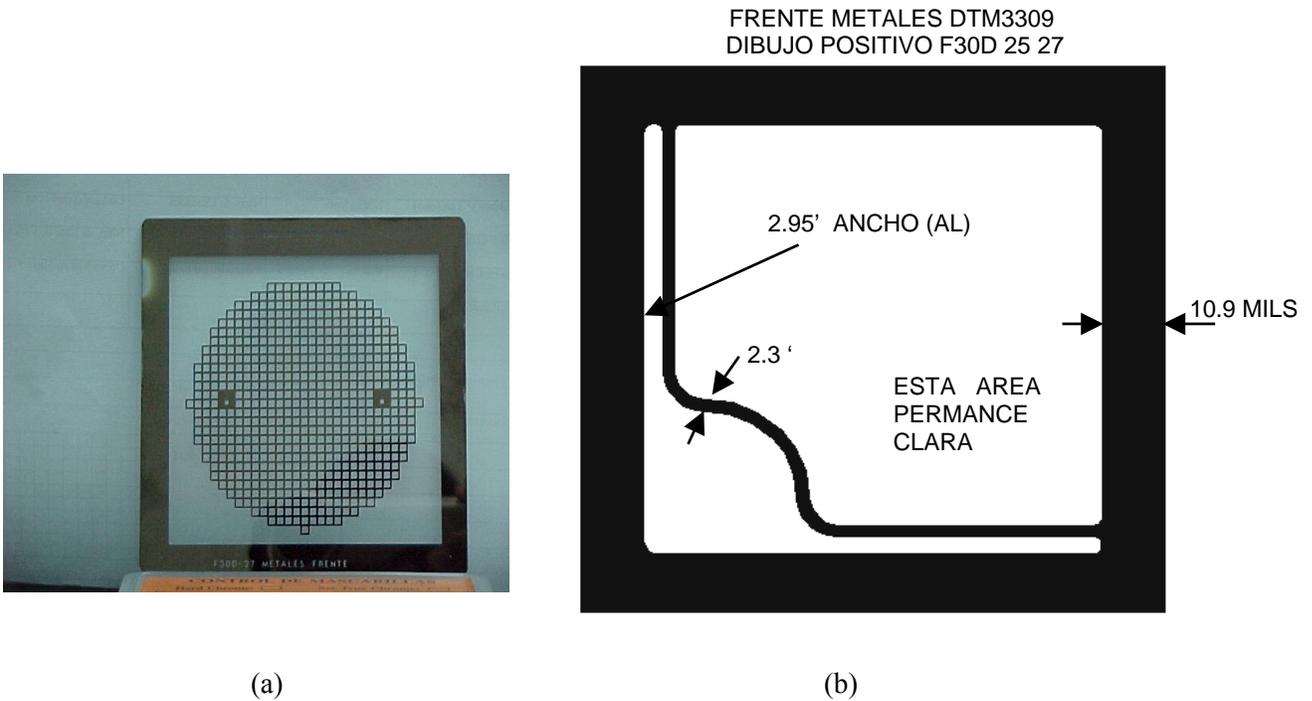


Fig. 3.5. a) foto mascarilla F30D-27, fuera de la caja de protección. b) Mascarilla positiva F30D-27, fotoresistivo metales

3.7. Analisis de las obleas del prototipo. [7]

A fin de verificar cómo se ve físicamente una sección real de los dados y obleas, se realizaron cortes transversales para poder observarlas en equipos como el SEM a alta amplificación. El objetivo es ver físicamente las uniones, los cortos, la sección p y n en la oblea usando cortes transversales. Esto confirma lo revisado anteriormente con la práctica. En las siguientes fotos se ven cada uno de los prototipos, mostrando secciones transversales de los dados usados y construídos en el área de obleas.

Las siguientes fotos (fig 3.6 a 3.11) nos muestran una comprobación de la realidad física de los tiristores con gatillos en la orilla y en la esquina. Las muestras se tratan con soluciones para pintar las uniones y áreas seleccionadas, se selecciona el área a fotografiar en alta amplificación, utilizando, primero un microscopio de bajo poder, en este caso para el grupo de prueba T1 (gatillo en la esquina), se tienen las siguientes fotos.

Para el grupo de prueba T1 (gatillo en la esquina) tenemos las siguientes fotos finales, tomadas en el SEM, y unidas para ver el dado en forma completa. Donde pueden verse los detalles de las uniones tipo n y p, y los puntos de corto, Fig 3.11.

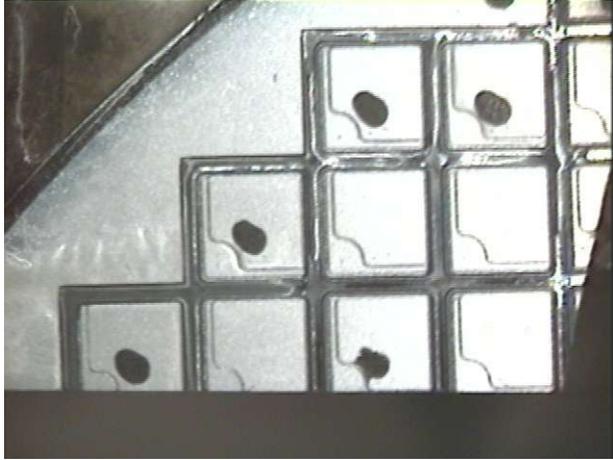


Fig 3.6. Acercamiento para seleccionar el área.



Fig 3.7 Una muestra sin pulir para ver diferencias con una pulida y pintada.

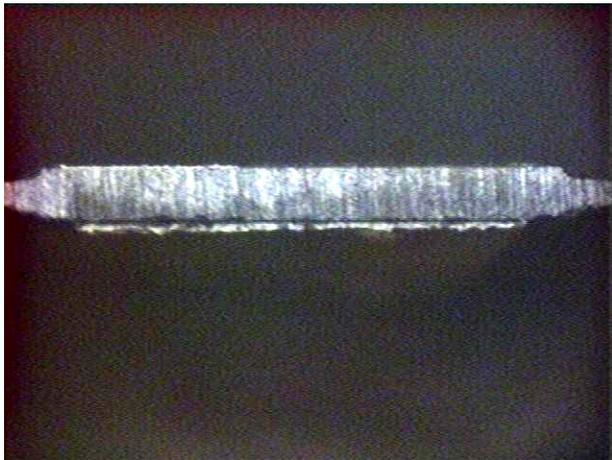


Fig. 3.8 selección de un dado, pulido y pintado.



Fig 3.9 Aumento de magnificación para ver detalles, este ya es el SEM.

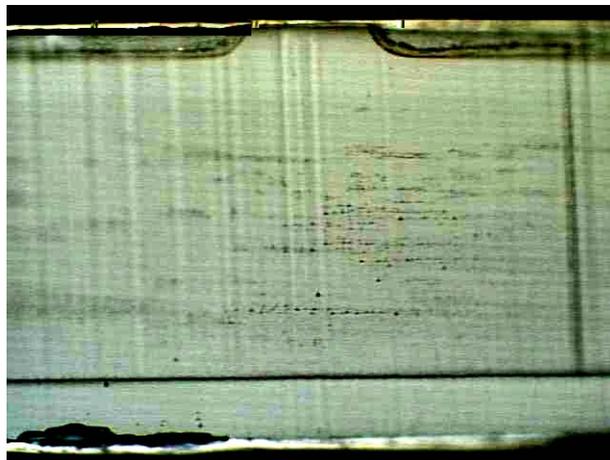


Fig 3.10 Magnificación donde ya es posible observar las uniones. Tomada en el SEM.

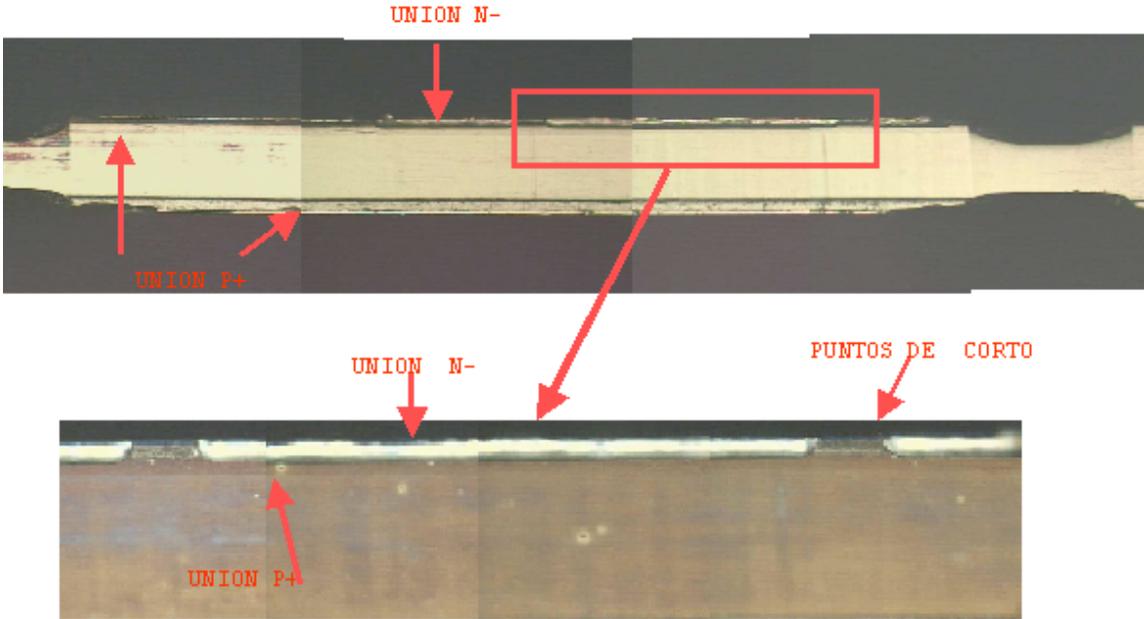


Fig 3.11. Fotos del SEM tomadas a una muestra del grupo T1, gate a la esquina.

Esto mismo se repite para el grupo T2 vease Fig 3.12, y para T3 véase fotos adicionales en las fig 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16 para el proceso de toma de las fotos.

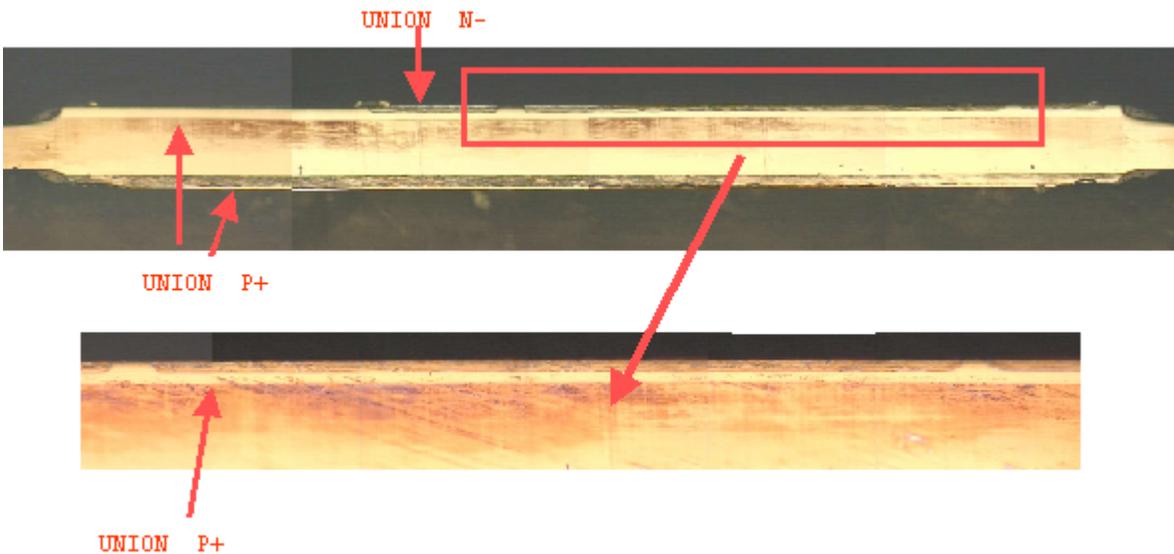


Fig 3.12. Fotos del SEM tomadas a una muestra del grupo T2, gatillo en la esquina.

Para el grupo T3 de prueba, gatillo en la orilla, se hicieron fotos adicionales para ver de dónde se seleccionaba el área a tomar las fotografías con más detalle; esto sirve como guía en los otros grupos,

véanse los detalles en cada foto mostradas en las figuras 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16. La foto correspondiente del SEM puede verse en la fig 3.17.

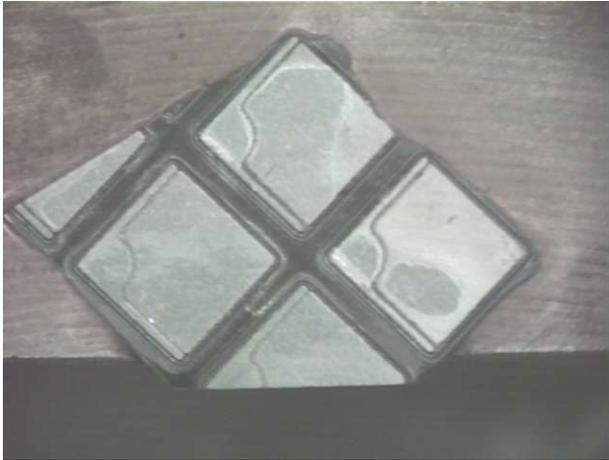


Fig 3.13. Obleas del grupo T3, gatillo en la esquina. Magnificación a bajo poder mostrando el área seleccionada.

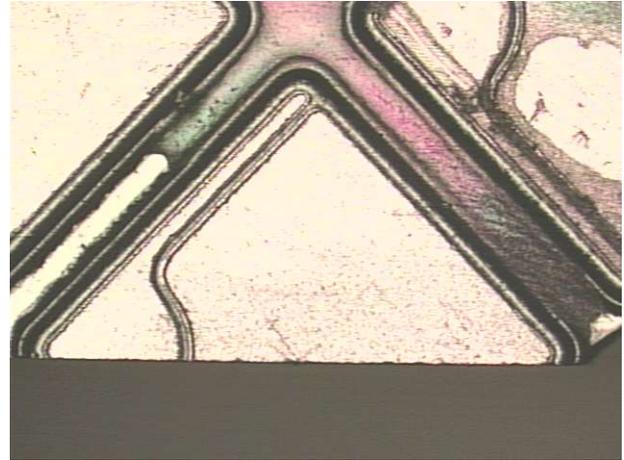


Fig 3.14. Acercamiento del área a analizar.



Fig 3.15. Magnificación del área seleccionada. Se puede ver el detalle de un corto en el cátodo. antes de pulido.



Fig 3.16. magnificación máxima de bajo poder. Se puede ver el corto con más detalle. Esta es el área que se verá a detalle en el SEM antes de pulido.

Para el grupo de control (gatillo en la orilla) se procedió en igual forma, véanse las fotos con una aproximación de las obleas (fig 3.18 a 3.21) y luego las fotos en el SEM (fig 3.22).



Fig 3.17. Fotos del SEM tomadas a una muestra del grupo T3, gatillo en la esquina.

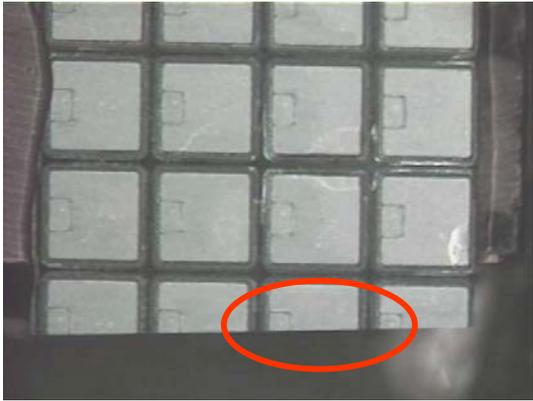


Fig 3.18. Acercamiento de la oblea del grupo de control. Pueden verse los detalles del gatillo, y el área seleccionada para la inspección.

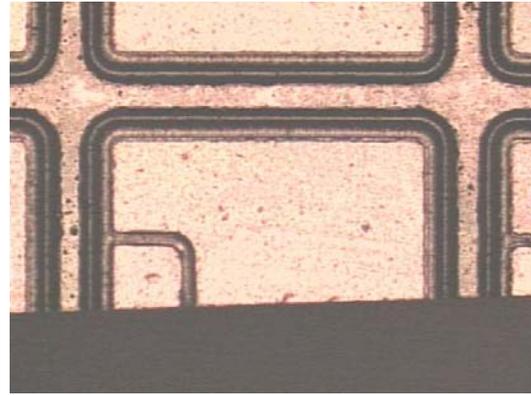


Fig 3.19. Magnificación del gatillo en la orilla. Esta será el área a inspeccionar a más alta magnificación en el SEM, ya pulida.



Fig 3.20 Otra vista del nivel de magnificación donde se observa un corto cerca de la orilla.



Fig 3.21 misma magnificación pero con diferentes filtros de luz.

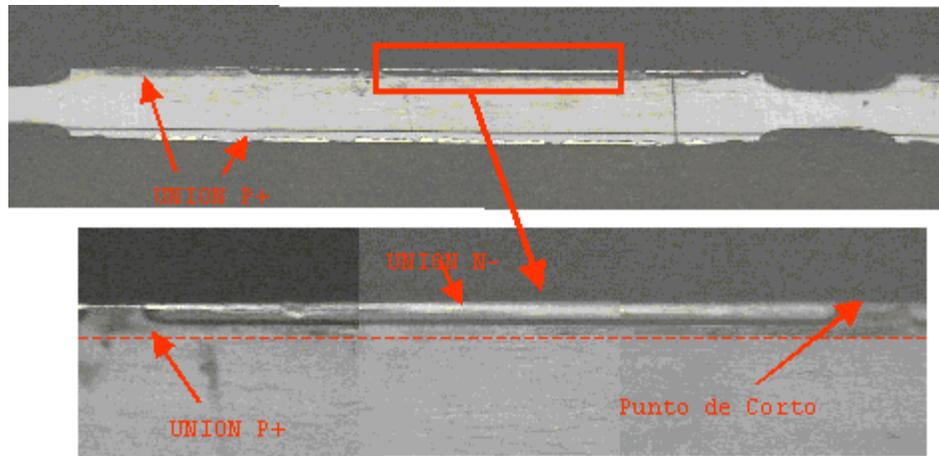


Fig 3.22. Fotos del SEM tomadas a una muestra del grupo de control, gatillo en la orilla.

3.8. Pruebas eléctricas de los grupos fabricados (a nivel de oblea): [1,5,7,8,9,10,11,12,13]

Para asegurarse que el dispositivo semiconductor o dados van a realizar su función eléctrica de acuerdo a sus especificaciones, se realizaron varios monitores eléctricos durante el proceso tecnológico de obleas. Con esto se asegura que los dados que lleguen a las áreas de ensamble van a ser capaces de trabajar eléctricamente en el campo dentro de la especificación eléctrica que se le asigna.

Cuando se construye la oblea, las distancias de difusión y penetración, el proceso de fotovidrio y la separación de los dados en las calles y capas semiconductoras tipo p y n, definen la capacidad de voltajes de rupturas, y la capacidad de corriente que el dispositivo va a soportar.

Estos valores de voltajes y corrientes se van definiendo en los pasos del proceso semiconductor del dado y se determinan cuantitativamente en el área de ensamble y se le asignan al dado en las pruebas eléctricas finales.

Los puntos de monitores eléctricos en el área de obleas son:

3.8.1 Monitor de class probe.

Antes de la operación de horneado de fotovidrio (firing) se hace la primera operación de prueba eléctrica. Esta se conoce como “class probe” y debe su nombre a la abreviación de la palabra inglesa “classification” y “probe” probar, y es la primera prueba de clasificación eléctrica de las obleas semiconductoras. Es aquí donde los voltajes de ruptura se monitorean por primera vez. Refiérase a la tabla 3.4 para ver los respectivos valores límites de voltaje y corriente y las fugas también directa e inversa. En esta operación generalmente se toman 3 dados por obleas al azar para hacer el monitor eléctrico. Véase la figura 3.23 para la selección de los 3 dados por oblea, y la tabla 3.6 para la selección de la oblea.

GRUPOS PARA MONITOR ELECTRICO DE CLASS:				
	Grupos	Tiempos	Identificación de Obleas	Oblea # para CLASS
Control	Normal	170 min	1, 2, 5, 7, 8, 9	5
Prueba	T1	170 min	3, 13, 17, 18, 20, 23	13
	T2	150 min	4, 11, 12, 14, 21, 22	11
	T3	120 min	6, 10, 15, 16, 19, 24	10

Nota: las siguientes obleas se rompieron durante el proceso la 18, 22, 23

Tabla 3.6 Obleas para el primer monitor eléctrico antes de firing.

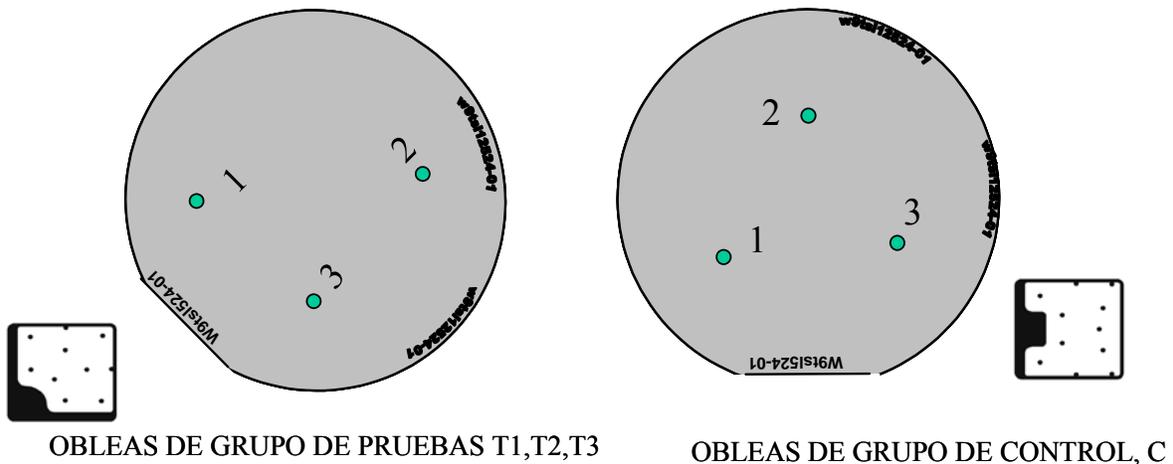


Fig 3.23. Mapa para la selección de los 3 dados dentro de cada oblea para el monitor eléctrico antes de firing.

Las lecturas del monitor de “class” son como siguen, (vease la Tabla 3.7), en este monitor el muestreo normal es de 3 obleas por lote, y 5 dados por oblea. Para el experimento se hizo un muestreo especial, de 1 oblea por cada grupo (ya que estamos hablando del mismo lote de obleas) y 3 dados por oblea. En esta prueba, el interés es ver los voltajes de ruptura que tienen los dados, los que se obtienen aplicando una fuga pequeña y leyendo el voltaje en el equipo especial para pruebas eléctricas conocido como Mastech, número BK601. Refiérase a la línea de V (Voltaje en cada grupo). Los límites están dados en la Tabla 3.10 para el DTM3308. Posteriormente se checan las fugas del dispositivo, aplicando voltaje positivo y negativo de 850 volts. Las pruebas de Fuga son I_{AF} , en sentido directo e I_{AR} en sentido inverso.

Los valores encontrados en este monitor indican que las obleas se han procesado dentro de los requerimientos establecidos y cumplen hasta este momento, con los requerimientos de Voltaje de ruptura y de fuga. En las siguientes operaciones se verán más definidos los parámetros eléctricos.

Las primeras pruebas eléctricas de “class probe”, mostraron un mejor desempeño eléctrico en fuga, menores fugas al voltaje de prueba y mejores voltajes de ruptura. Ambos dispositivos se diseñaron para la clasificación de 800.

Después de asegurarse que los parámetros eléctricos están bien se pasa entonces a la operación de firing. Si se hubiera encontrado mucha discrepancia, en este punto, es aún factible de retrabajar los lotes de oblea para mejorar el desempeño eléctrico en este monitor.

GRUPOS PARA MONITOR ELECTRICO DE CLASS:							
	Grupos	Tiempos	Oblea #	TEST	Dado 1	Dado 2	Dado 3
Control	Normal	170 min	5	V	400 V	319 V	322 V
				IAF	5.0 μ A	3.47 μ A	5.4 μ A
				IAR	3.8 μ A	3.94 μ A	4.4 μ A
Prueba	T1	170 min	13	V	1520 V	537 V	400 V
				IAF	0.0 μ A	3.4 μ A	4.9 μ A
				IAR	0.0 μ A	1.4 μ A	2.8 μ A
	T2	150 min	11	V	639 V	1000 V	1000 V
				IAF	3.38 μ A	3.25 μ A	2.88 μ A
				IAR	3.99 μ A	3.94 μ A	3.79 μ A
	T3	120 min	10	V	410 V	340 V	400 V
				IAF	5.2 μ A	4.23 μ A	4.84 μ A
				IAR	4.38 μ A	3.8 μ A	4.0 μ A

Mediciones de Voltaje, y mediciones de fuga IAF y IAR aplicando voltajes de +/- 850 Volts.

Tabla 3.7 Lecturas del monitor eléctrico de firing, para verificar voltajes de ruptura y fugas de los lotes.

3.8.2 Prueba final de obleas por 48A.

En esta prueba es donde todos los parámetros se verifican siguiendo la especificación denominada 48A, mostrada anteriormente en la tabla 3.4. El nombre de 48A es debido a que todas las especificaciones eléctricas en su número de documento inician con 48A. Solo el dispositivo de control cuenta con el documento 48A y este viene siendo el número 48ARB62605B. Vease el siguiente capítulo para ver esta especificación. Aquí se hacen monitoreos por oblea, generalmente se toman 6 datos al azar. Algunos productos tienen 100% prueba eléctrica.

Las lecturas de prueba final de obleas tomadas en el proceso tecnológico de las obleas, se tomarán por grupo de proceso C, T1, T2 y T3. Para la toma de los datos se procedió como sigue:

Por oblea se prueban 6 datos, como muestreo, para el experimento se siguió lo establecido en la tabla 3.8 donde puede verse los grupos de obleas de control y prueba, los números de las obleas, y las obleas seleccionadas para la prueba de prueba final (class) al azar. Para la selección de los datos dentro de la oblea se siguió el orden mostrado en la fig 3.24, así se tendrían lecturas de 6 datos, y de cuatro obleas, datos suficientes para analizar el perfil eléctrico de los dispositivos.

GRUPOS PARA PRUEBA FINAL DE OBLEAS (CLASS):				
	Grupos	Tiempos	Identificación de Obleas	Oblea # para CLASS
Control	Normal	170 min	1, 2, 5, 7, 8, 9	5
Prueba	T1	170 min	3, 13, 17, 18, 20, 23	20
	T2	150 min	4, 11, 12, 14, 21, 22	12
	T3	120 min	6, 10, 15, 16, 19, 24	19

Nota: las siguientes obleas se rompieron durante el proceso la 18, 22, 23

Tabla 3.8 Obleas para pruebas de CLASS en la prueba final eléctrica en el área de obleas.

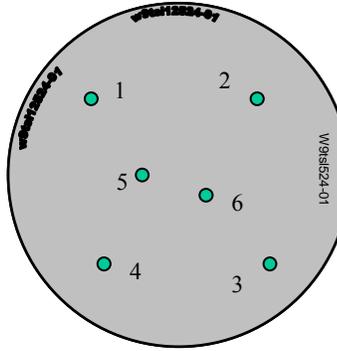


Fig 3.24. Mapa para la selección de los 6 dados dentro de cada oblea para prueba final de obleas.

Las lecturas de prueba final, se toman 6 dados por oblea de cada lote. En este caso será de cada grupo. Aún así, este monitor ya se prueba con todas las pruebas eléctricas de la 48 A. Esto es importante porque se necesita analizar el comportamiento de fugas y voltajes entre ellos mismos. Para una forma de verificar en el laboratorio de confiabilidad, se le hizo un muestreo por grupo de 100 unidades, las cuales serán analizadas en el siguiente capítulo y en las conclusiones.

Los parámetros vistos en las tablas 3.4 y 3.10 son utilizados para la realización de estas pruebas. Se utiliza un equipo automático Mastech, BK703, Modelo 316, equipado con un microscopio para realizar el ajuste de las agujas, dos de ellas estarán haciendo contacto en el área del cátodo y una aguja en el área del gatillo. Se carga la rutina de prueba eléctrica para el DTM3308T y para el DTM3309T se harán ligeras modificaciones en voltajes y fugas debido al efecto del diseño del gatillo. Una vez ajustado esto se cubre con un manto negro la sección del soquet de prueba donde está la oblea y las agujas. Este manto negro quita la luz y evita que la fuga sea afectada por la luz normal del cuarto de pruebas. Se corre el equipo en forma automática y él mismo se encarga de probar los dados necesarios por oblea. El equipo contiene una aguja más con inyección de tinta, la cual sirve para marcar los rechazos eléctricos colocándoles una gota de tinta sobre la superficie. El equipo es capaz de hacer clasificación (data login) y guardar las lecturas en archivos digitales para su posterior análisis.

Una relación importante a considerar durante las pruebas finales, es la relación de corrientes I_h a I_{gt} .

Esta relación nos indica el balance de la razón de I_h/I_{gt} , y nos habla de la relación matemática de las áreas de diseño de los gatillos con la capacidad de controlar el dv/dt y el di/dt . Se ha encontrado que:

Para diseño con gatillo en el centro tenemos: $I_h/I_{gt} < 1$

Para diseño con gatillo en la orilla tenemos: I_h/I_{gt} aprox igual a 2 (> 1)

Para diseño con gatillo en la esquina tenemos: I_h/I_{gt} aprox igual a 1

Estas relaciones se deben de mantener para que el tiristor pueda funcionar correctamente y hacer las funciones para las cuales fue diseñado.

El nuevo concepto de gatillo en la esquina debe mantener una relación de corrientes igual a 1. A continuación se muestra un sumario de los resultados eléctricos en la Tabla 3.9 con relación a estas corrientes por grupo del experimento. En base a los resultados se seleccionaron los grupos que pasan a la siguiente etapa, es decir al área de ensamble y dar un mejor análisis en las variaciones esperadas de las operaciones de Back-End. Son grupos de 6 lecturas de datos por oblea.

GRUPO	Oblea	I _H /I _{GT}	SDV
C	1	2.44	0.08
	2	2.46	0.06
	5	2.45	0.04
	7	2.43	0.05
	8	2.40	0.05
	9	2.41	0.09
T1	3	1.16	0.05
	13	1.17	0.04
	17	1.22	0.09
	20	1.19	0.09
	23	1.18	0.03
T2	4	1.23	0.06
	11	1.26	0.12
	12	1.20	0.03
	14	1.19	0.05
	21	1.17	0.03
	22	1.16	0.04
T3	6	1.24	0.06
	10	1.25	0.02
	15	1.18	0.10
	16	1.24	0.11
	19	1.24	0.10
	24	1.17	0.03

I_H / I_{GT} son los valores Xmean = valores promedios de los 6 datos por oblea.

SDEV = Desviación estándar de los valores I_H/I_{GT}

Tabla 3.9 Sumario de resultados en las pruebas eléctricas I_H , I_{GHT} en prueba final de obleas. Se calculó la relación por cada oblea y grupo.

Las Obleas marcadas en la Tabla 3.9 con amarillo son las que se seleccionaron para la manufactura en el área de ensamble, debida a su proximidad al valor de uno en los grupos de prueba y a su baja dispersión. Estos son los valores promedios de la lectura de los 6 datos por oblea, se sacó su media y desviación estándar. En el caso del grupo de control se escogió la oblea con menos dispersión.

Los valores encontrados y el cálculo de la relación I_h/I_{gr} muestra la relación que va de acuerdo a la teoría, el valor de la relación en el nuevo concepto (Gatillo en la Esquina) es cercano o igual a la unidad, mientras que en el grupo de control (gatillo en el centro) es mayor que uno o igual a dos.

En la siguiente Tabla 3.10 se dan los valores límites de voltaje y corriente para la familia de los SCR que se procesan en el área de obleas semiconductoras, nuestros datos en cuestión son los 3308 y 3309. Mismo comentarios que para la Tabla 3.5, los valores eléctricos se modificaron para las pruebas

eléctricas del grupo de prueba, pues mostró ligeras variaciones electricas debido al nuevo diseño del gatillo en la esquina.

			3308		
	Prueba elect	Proceso	cond.	Limite	Limte2
1	VON1 MAX	class probe FT 48A	6A 16A 16A	1.4V 1.71V 1.8V	
2	IH MIN	class probe FT 48A	2.5V 12V 12V	6 .mA 4.4 .mA 4 .mA	
3	IH MAX	class probe FT 48A	2.5V 12V 12V	27 .mA 27 .mA 30 .mA	27 .mA 36 .mA 40 .mA
4	IGT MIN	class probe FT 48A	10V 12V 12V	4 .mA 2.1 .mA 2 .mA	
5	IGT MAX	class probe FT 48A	10V 10V 12V 12V	25.5 .mA 13 .mA 18 .mA 20 .mA	
6	VGT MIN	class probe FT 48A	10V 12V 12V	0.55 V 0.525 V 0.5 V	
7	VGT MAX	class probe FT 48A	10V 12V 12V	0.95 V 0.95 V 1 V	
8	IAKF MAX	class probe FT 48A	650 V 606 V 600 V	1.2 uA 9 uA 10 uA	
9	IAKR MAX	class probe FT 48A	650 V 606 V 600 V	1.2 uA 9 uA 10 uA	
10	BVGR MAX	class probe FT 48A			
11	IL MIN	class probe FT 48A	10 V	4.16 .mA X X	
12	IL MAX	class probe FT 48A	10 V	28.8 .mA X X	

Tabla 3.10 Valores Eléctricos para los SCR de Soldado de Alambre.

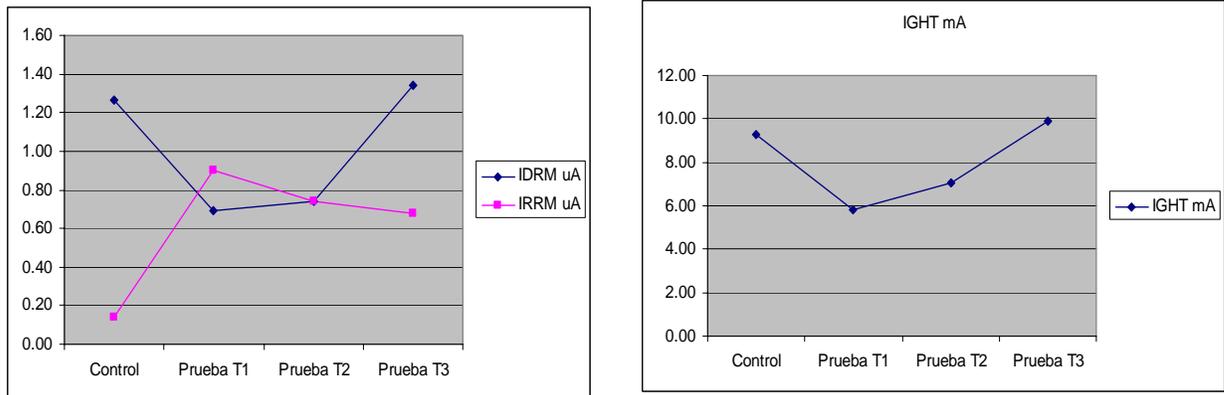
3.9 Comparación de resultados entre grupos (a nivel obleas). [7,10]

En base a los resultados obtenidos en los incisos anteriores, se puede hacer una comparación con el fin de comparar el desempeño entre el grupo de control (tiristor convencional) y los grupos de prueba (tiristor con gatillo en la esquina), teniendo en cuenta los siguientes lineamientos deseables:

- Fugas bajas (i_{drm} , i_{rr} , i_{ght} , i_h)
- Voltajes de rupturas altos (v_{drm} , v_{rrm})
- Voltajes de encendido del tiristor bajos (v_{tm})
- Voltajes de encendido de gatillo bajos (v_{hgt})
- Resistencias de gatillo a cátodo bajas

Las figuras 3.25, 3.26, 3.27, 3.28 muestran el resultado de la medición de 36 muestras en cada punto para los parámetros: IRRM, VGT, RGK, IGHT, correspondientes al grupo de control (170 minutos de difusión de cátodo), a prueba T1 (170 minutos de difusión de cátodo); prueba T2 (150 minutos de difusión de cátodo); y prueba T3 (120 minutos de difusión de cátodo), respectivamente.

En las siguientes figuras se pueden ver los resultados de las mediciones de fugas en el monitor de class, se ve que el grupo de control para las fugas inversas tuvo un mejor desempeño, los grupos de prueba mantuvieron una fuga cercana al mismo nivel. Para el caso de las fugas directas el grupo de control y el grupo T3 presentaron una fuga más alta con respecto a T1 y T2. Se concluye de esto comparándolos con el valor esperado de 2mA (48 A) que en este caso, los valores obtenidos están casi 3 órdenes de magnitud más abajo. Estas fugas variarán por el efecto de las operaciones siguientes y de ensamblajes por la adición de pequeñas resistencias eléctricas o por contaminaciones en el proceso. Los grupos T1 y T2 muestran un equilibrio entre I_{drm} y I_{rrm} , lo que hace a los tiristores sean más simétricos y que tengan un desempeño más ideal.



En esta fig 3.25 Fugas inversas e IH

Para las gráficas de la resistencia de gatillo a cátodo, se ve que los valores de los diferentes grupos están entre 80 y 120 ohms, estos valores están muy por debajo de los valores esperados (422-462 ohms), los grupos con los menores valores son el de control y el T3. Para el caso de la gráfica de voltajes de encendido y del gatillo los valores encontrados están dentro de las especificaciones, nuevamente muy por debajo de estos.

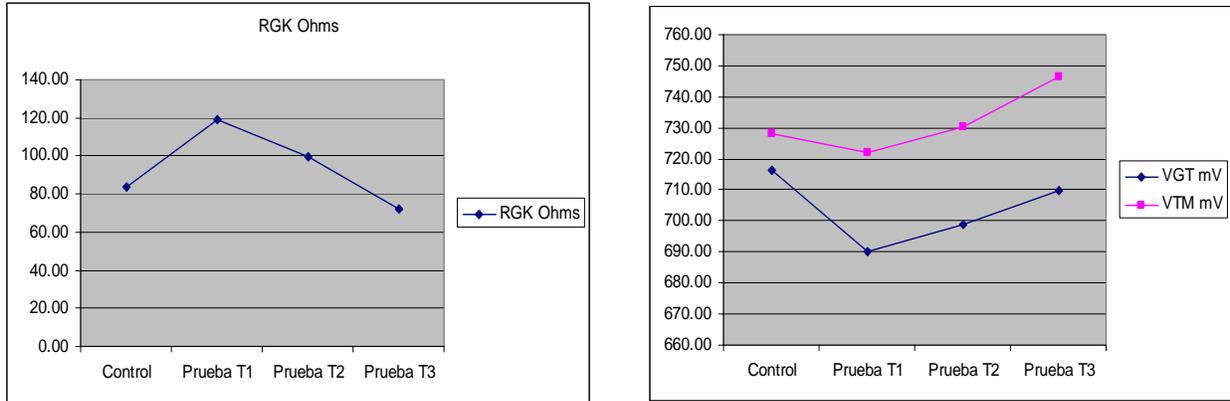


Fig. 3.26. Resultados de Class en gráficas mostrando relación de corrientes, voltajes y Rgk.

Los valores de I_H/I_{GHT} indican una relación cercana a dos para el diseño con gatillo en la orilla, (diseño normal) lo que indica un desbalanceo inherente al mismo diseño, contra la relación de uno en el nuevo diseño, indicando una relación más balanceada. Véanse las gráficas siguientes en la Fig. 3.27.

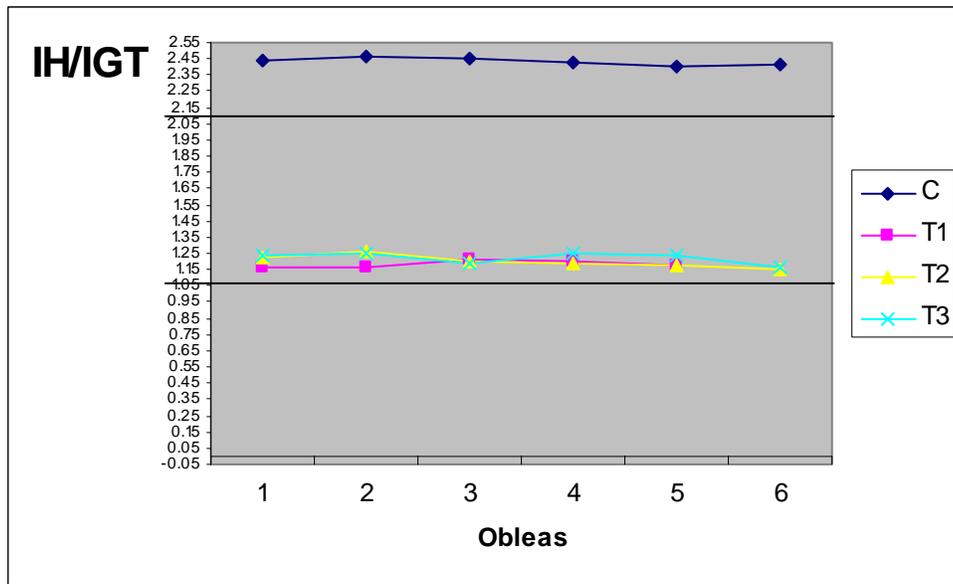
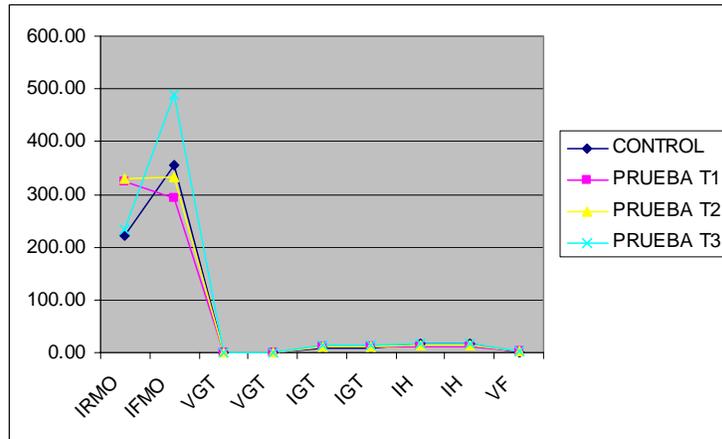


Fig.3.27. Relación de I_H/I_{GHT} , se muestra la relación a 1 y a 2.

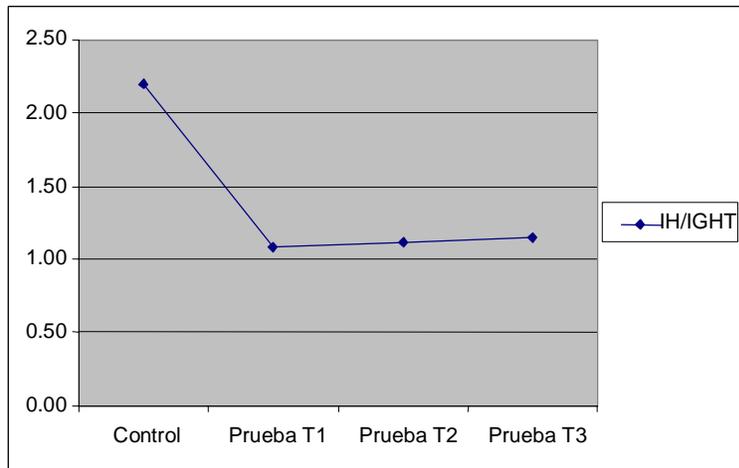
3.10 Comparación de resultados eléctricos en los grupos de ensamble. [7,10]

- En las áreas de prueba final, se evaluaron 100 unidades de cada grupo y sobre de ellas se sacaron los estadísticos. Nuevamente los grupos de prueba mostraron una mejora con respecto al grupo de control. Nuevamente las relaciones de corrientes I_H/I_{GHT} muestran la relación dos contra uno y a pesar de que hay un pequeño corrimiento en las fugas eléctricas, desde obleas hasta prueba final, esto no afecta las conclusiones que se mencionaron en estas áreas. Véanse las gráficas en la Fig. 3.27, donde se muestran estos resultados. En la figura fig. 3.28 (a) se ve la comparación de todos los parámetros eléctricos. Los primeros parámetros se ven en diferentes escalas porque combinan

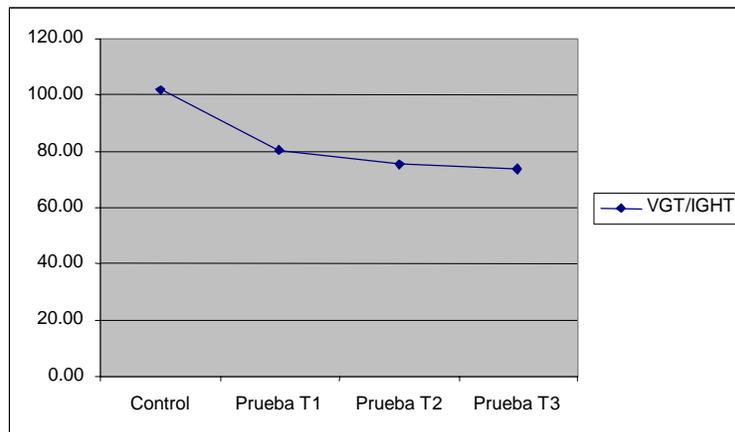
corrientes y volajes en la mismas gráficas. En la Fig 3.28 (b), nuevamente la relación de IH/IGHT y en la Fig 3.28 (c), los valores de las resistencias de cátodo.



(a)



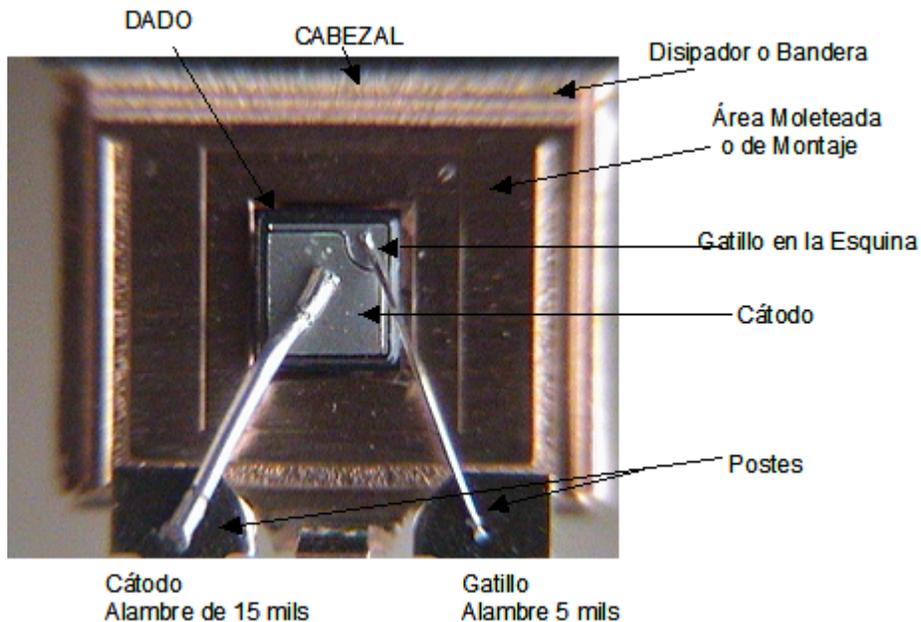
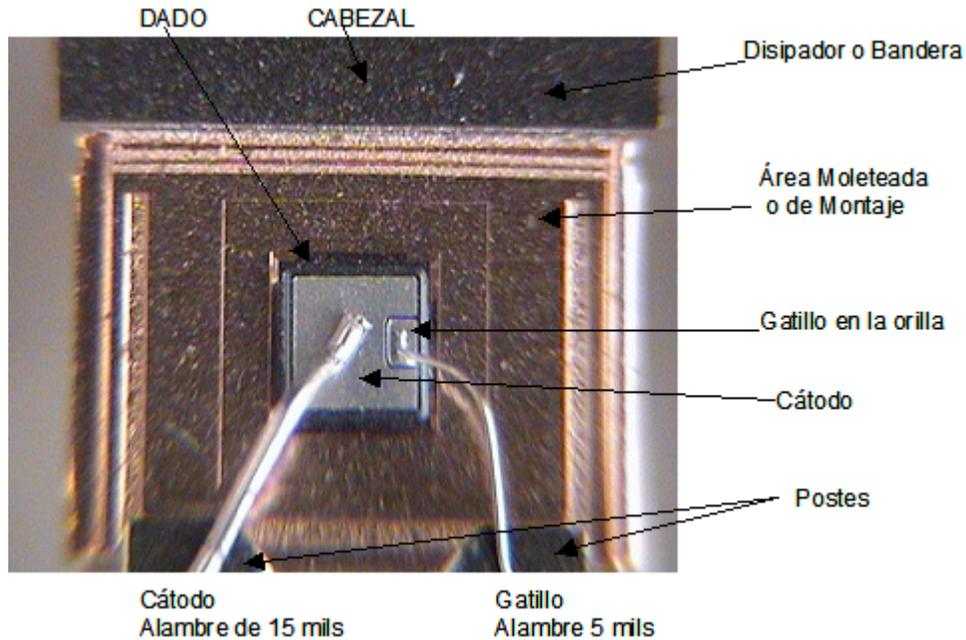
(b)



(c)

Fig. 3.28 Resultados gráficos de las 100 unidades en ensamble.

En las figuras 3.29 y 3.30 se muestran las fotografías de los dados ya ensamblados en la tira de TO-220 correspondientes a los tiristores con gatillo en la orilla y gatillo en la esquina, respectivamente. Después del montaje de estos dados en sus respectivas tiras, pasan al proceso de empaquetamiento donde se le coloca un compuesto de moldeo para protección mecánica, así en esta forma se realizaron las pruebas eléctricas de todos los grupos.



3.11 Prueba eléctrica de unidades encapsuladas. [1,5,7,10]

Todos los grupos del experimentos fueron probados eléctricamente en prueba final para asegurar que se siguió todo el flujo de manufactura. Se le hicieron registros (data log) a 100 unidades por grupo para su análisis.

A continuación describimos las diferentes tipos de pruebas eléctricas.

3.11.1. Descripción de prueba eléctricas.

Las pruebas eléctricas se encuentran en toda la industria electrónica hoy en día. Se encuentran en las líneas de manufactura que se dedican a la tecnología de obleas; áreas de ensamble (back-end); áreas de calidad; laboratorio de pruebas; laboratorios de análisis de fallas; laboratorio de confiabilidad (o de pruebas de vida); laboratorio de diseño; etc.

Las pruebas eléctricas se dividen en dos grandes grupos que son: estáticas y dinámicas.

Ambas pueden estar presentes en los procesos tecnológicos de obleas, en las áreas de ensamble (back-end), en las áreas de control de calidad para las Inspecciones de calidad como monitores y gates.

3.11.2. Las pruebas estáticas.

Son aquellas en las cuales al dispositivo se le aplican condiciones de prueba fijas, sin variaciones, la corriente o el voltaje aplicado se mantiene constante ya sea con temperatura ambiente (25 °C), alta (+85 °C, +100 °C, +125 °C, +150 °C, +175 °C, +200 °C) o debajo de cero grados celcius (-25 °C, -40 °C, -50 °C, -65 °C, -85 °C). A éstas también se les conoce como pruebas de DC o de “corriente directa”. La forma de hacer estas pruebas de DC o estáticas, consiste en tener un estímulo que bien puede ser Voltaje, o Corriente, que se aplica al dispositivo mediante circuitos eléctricos en los cuales se puede medir corriente o voltaje dependiendo del estímulo. Si éste es voltaje, se leerá corriente como variable de salida del circuito. Si se aplica corriente, se leerá voltaje como función de salida.

3.11.3. Las pruebas dinámicas.

Las pruebas dinámicas son aquellas en las cuales al dispositivo se le aplican condiciones de prueba variables, la corriente o el voltaje varían con respecto al tiempo, como transitorios por ejemplo, en los circuitos de prueba y la frecuencia de prueba debe ser considerada. A este tipo de prueba también se le conoce como “pruebas de AC”. Una fuente alterna es conectada al circuito, ya sea de voltaje o de corriente y se tiene que son funciones del tiempo.

Las pruebas dinámicas o de AC, son más complicadas que las de DC y los circuitos son diferentes. Estas se prefieren para las pruebas de caracterización de dispositivos y para las pruebas de vida. El nivel de seguridad personal se incrementa al manejar corrientes de AC y los circuitos se vuelven un poco más peligrosos el estar manejándolos.

Las pruebas de AC simulan mejor las aplicaciones de la vida real y de pruebas de campo, debido a que en la vida normal se usa más AC, pues todo varía con el tiempo.

Resumen:

En este capítulo vimos cómo los grupos diferentes para el experimento fueron definidos, y planeados para su construcción en el área de obleas. Se mostró que el nuevo diseño requirió que las mascarillas del frente fueran rediseñadas para obtener el gatillo en la esquina. Se mostraron los principales parámetros y mediciones de los procesos de obleas como son la difusión de cátodo, la de fósforo, grabado de mesa y prueba de unidades y los parámetros eléctricos para los prototipos. Se mostró un análisis adicional de fotos y microsecciones de dados físicos para mostrar los detalles de uniones, cortos, difusiones usando equipos de alta magnificación como es el SEM. Se cubrió el punto de los resultados de las mediciones eléctricas a nivel de las obleas semiconductoras en los dos principales puntos de prueba como son class probe y prueba final, y el concepto importantísimo de la relación I_H/I_{ght} como balance del tiristor en el diseño. Se reviso como los dispositivos son montados en tiras de metal para luego ser encapsulados para sus pruebas eléctricas como componentes ya terminados.

CAPITULO 4

Pruebas eléctricas dinámicas a las unidades empaquetadas

Introducción: En este capítulo veremos las diferentes pruebas de caracterización que existen para asegurar que los dispositivos semiconductores trabajarán como fueron diseñados y seguirán sus especificaciones eléctricas durante las aplicaciones de campo, los dispositivos se usan dentro de sus valores permitidos de operación. En particular se verán las pruebas dinámicas dv/dt y di/dt que son las principales para este experimento.

4.1 Pruebas de caraterización. [1,7,10,11]

En este capítulo veremos las pruebas que se llevaron a cabo en el laboratorio de caraterización para demostrar que el nuevo diseño es mejor en respuesta de dv/dt y di/dt , en función del área de los dedos del gatillo y que la forma alrededor de dos lados es de mejor desempeño que el diseño normal (gatillo en la orilla) y mejor aún que el original diseño en el centro.

Las pruebas de caracterización cubren las pruebas estáticas, que son las que se cubrieron en el capítulo anterior, en las cuales se corrieron 100 unidades por grupo ensamblado (control-C, prueba 1-T1, prueba 2 – T2 y prueba 3 – T3), y se les midió en prueba final, todas sus pruebas eléctricas de acuerdo a 48A (especificación eléctrica).

Generalmente al estar evaluando nuevos dispositivos o cambios, se requiere de un lote de control para comparación y 3 lotes diferentes del nuevo proceso para poder cubrir variaciones de lote a lote y ver los diferentes efectos en dichos lotes en desempeño, manufactura, eléctrica y de aplicaciones.

El laboratorio de caracterización permitirá ver la parte de la aplicación, simulando aplicaciones en el campo. Esto dará una idea clara de cómo el nuevo dispositivo se va a desempeñar cuando se ponga a trabajar en condiciones reales de aplicación.

Las pruebas de aplicaciones se caracterizan principalmente por ser pruebas y condiciones dinámicas. En éstas, la corriente alterna AC juega un papel importante y las pruebas de esfuerzo como sobre-voltaje (Surge) y sobre-corriente, son comunes y simularán la aplicación real del tiristor con los diferentes diseños.

Una de las principales preocupaciones en la aplicación de los tiristores es “*El disparo en Falso del tiristor*”. Durante su aplicación, las condiciones de los circuitos pueden causar que cuando el tiristor debe estar apagado y con ausencia de señal en el gatillo, éste cambie de apagado a encendido en forma no deseada. Esto puede deberse principalmente a: 1) Alta variación en el cambio del voltaje de ánodo, éste se conoce como el efecto dv/dt ; 2) transientes en los voltajes causando la ruptura del voltaje de ánodo, y 3) transientes esporádicas en la señal del gatillo. Parte de las pruebas de caracterización permite conocer los niveles de dv/dt , di/dt que presentarán los tiristores durante su aplicación.

El proceso de caracterización permite también estudiar el comportamiento y desempeño de los tiristores para mejorar el diseño. Esto lo hace estudiando todas aquellas capacidades relacionadas con la aplicación y su entorno de operación del tiristor analizando las medidas y resultados obtenidos.

Algunas de las características dinámicas de los tiristores se listan a continuación:

- 1) Caracterización Paramétrica (vista en el capítulo anterior),
- 2) Inmunidad al Ruido (dv/dt),
- 3) Capacidad de Conmutación (di/dt),
- 4) Capacidad de Manejo de Sobrecorriente (ITSM),
- 5) IOL pruebas de Vida Intermitente de Operación,
- 6) Prueba de Surge Exponencial (10x1,000 μ sec, 2x15 μ sec,..)

4.2 Definiciones. [1,5,10]

A continuación se listan algunas definiciones que serán de utilidad:

Para dv/dt :

- 1) (dv/dt)s Critical Rise of Off-State Voltage:

Es el valor mínimo de la tasa de aumento del voltaje directo, el cual causará la conmutación de la unidad del estado de apagado al estado de encendido. En otras palabras el (dv/dt)s de un tiristor, es la sensibilidad del tiristor al ruido (picos de voltaje en la línea), antes de que éste pase del estado de apagado al estado de encendido. Su unidad de medida es (V/ μ seg).

- 2) Fixture: Equipo, circuito o elementos auxiliares, que son parte de un equipo de prueba, los cuales son necesarios para poder obtener las condiciones de prueba de una evaluación determinada.
- 3) VDRM (Peak Repetitive Forward Blocking Voltage (SCR)) : Es el máximo valor permisible de voltaje repetitivo en directa, el cual puede ser aplicado sin que el SCR pase al estado de encendido.
- 4) VRRM (Peak Repetitive Reverse Blocking Voltaje (SCR)): Es el máximo valor permisible de voltaje repetitivo en inversa, el cual puede ser aplicado a la terminal ánodo del SCR.
- 5) VDRM (Peak Repetitive Off-State Voltage (TRIAC)): Es el máximo valor permisible de voltaje de apagado repetitivo, el cual puede ser aplicado sin que el TRIAC pase al estado de encendido.

Para di/dt :

- 6) di/dt : (Maximum rate of change of current the device will withstand)

Es el valor máximo de la razón de cambio de corriente en un tiempo determinado.

- 7) di/dt (on-state): (Maximum critical rate of rise on-state current),
Es el máximo valor de la razón crítica de cambio de la corriente de encendido que el dispositivo es capaz de sostener.
- 8) di/dt (on-state) repetitivo: Esta evaluación consiste en suministrar picos de corriente repetitivos (36,000 para TRIACS, 18,000 para SCRs) al dispositivo que se está evaluando con un valor predeterminado de corriente pico (IPK), ancho de pulso y di/dt bajo ciertas condiciones de capacitancia, inductancia, resistencia y temperatura.

4.3 Descripción de las pruebas dinámicas. [1,5,10]

A continuación se verán con más detalle las pruebas dinámicas; algunas de ellas se le hicieron a los grupos de nuestro experimento. Se revisará primero la descripción y en el párrafo 4.4 se verán los resultados obtenidos de nuestros grupos de evaluación, solo se verán caracterización estática; dv/dt , di/dt ; debido a que éstas son las más representativas para el objetivo del experimento, las demás no se hicieron.

4.3.1 Caracterización paramétrica.

Esta se vio a detalle en el capítulo anterior. Las pruebas estáticas están enfocadas más a medir los parámetros que definen las características de diseño del tiristor desde el proceso tecnológico, tales como IDR/IRRM, Igt, Vgt, IH, IL, Von, etc., con ciertas condiciones de voltaje, corriente, temperatura, etc.

4.3.2 Inmunidad al ruido (dv/dt)s.

Al parámetro dv/dt se le conoce también como dv/dt estático. Es el valor mínimo de la razón de incremento de voltaje en polarización directa el cual causará el cambio del estado de apagado al estado de encendido con el gatillo abierto. Se definió también como una medida de la sensibilidad al ruido. Otra forma de expresarlo es la habilidad de un tiristor para retener un estado de bloqueo bajo la influencia de un transiente de voltaje ajeno, que podría ser ruido o picos de voltaje en la línea.

El (dv/dt)s (s = estático) en el encendido es una consecuencia del efecto Miller y de la regeneración. Un cambio de voltaje a través de la unión capacitiva induce una corriente interna en ella. Esta corriente es proporcional a la razón de cambio del incremento de dv/dt . Si esta corriente llega a ser lo suficientemente grande por encima de la suma de las alfas de los transistores npn y pnp haciendo que esta suma tienda a la unidad, el tiristor se encenderá sin control.

¿Cuáles condiciones externas afectan el dv/dt (s)? se tienen dos casos que se consideran los peores: 1) cuando hay transientes en la línea aplicados a través del tiristor, y 2) cuando el tiristor no tiene voltaje inicial; estos voltajes se aplican a través del tiristor, en ese momento la capacitancia de colector alcanza su valor máximo debido a que el ancho de la zona de deserción del colector se hace mayor cuanto mayor es el voltaje aplicado.

Pequeños transientes son incapaces de auto cargar la capacitancia del gatillo a su valor de voltaje directo de umbral necesario para encender el dispositivo. El divisor de voltaje capacitivo entre las uniones de colector y gatillo-cátodo y los resistores construidos que hacen que la corriente del emisor-cátodo sean responsables por este efecto.

A través de estudios de caracterización, se ha establecido que el $(dv/dt)_s$ tiene una relación directa con la I_{gt} del tiristor. Se puede establecer que a mayor I_{gt} , menor es la sensibilidad del tiristor al ruido.

El equipo utilizado para la prueba del $(dv/dt)_s$ puede observarse en las figuras siguientes:

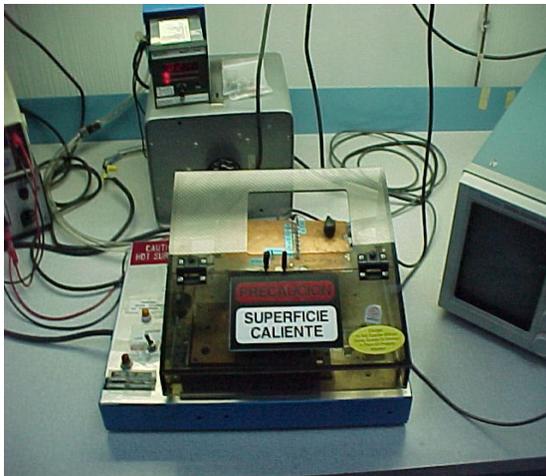


Fig. 4.1. Caja de Prueba de dv/dt .



Fig. 4.2. Multímetro dv/dt .

En forma general la prueba se realiza en una caja de prueba, se tiene que encender el plato calefactor de esta caja; para la señal de entrada se usa un generador de pulsos y un osciloscopio para tomar las lecturas. Con el multímetro se toman las medidas de voltaje sobre el tiristor. Se coloca el dispositivo a evaluar en la caja de prueba y se espera 5 minutos para que se establezca la temperatura. Se ajusta el interruptor a la posición VRRM (+), el SCR solo se evalúa en esta prueba y la perilla de la resistencia esté al tope. Se selecciona un valor de capacitancia a través del bloque de interruptores para iniciar la evaluación. Se aplica el botón de prueba, se verifica el voltaje y la resistencia se reduce. Se toman datos

tanto del osciloscopio del voltaje (delta V) y del tiempo (delta t), y se registra en la forma respectiva. Estos pasos se repiten hasta que se completan las unidades a probar.



Fig. 4.3. Osciloscopio dv/dt .



Fig. 4.4. Segundo Osciloscopio dv/dt .

4.3.3 Capacidad de conmutación (di/dt C): [1,5,10]

Se expresa también como: di/dt (en estado de encendido) y es la razón máxima de cambio de corriente que el tiristor soportará después de cambiar de un estado de apagado a un estado de encendido, usando la corriente especificada en el gatillo, sin que llegue a dañarse. En otras palabras, el valor máximo de la razón de incremento en la corriente de encendido al cual un tiristor puede soportar sin llegar a dañarse. En la Fig. 4.5 puede verse el circuito que se usa para realizar esta prueba. En este caso se tiene un tiristor de bajo valor de dv/dt . En al Fig. 4.6 puede verse el trazo típico que se obtiene al usar un trazador de curvas para tomar las mediciones. Para este caso se trata de un dispositivo: MAC997A8, snubber: $C = 10$ nF, $R = 75$ Ohms, Lectura: $di/dt = \Delta I / \Delta t$. $di/dt = 80.0$ A/ μ sec.

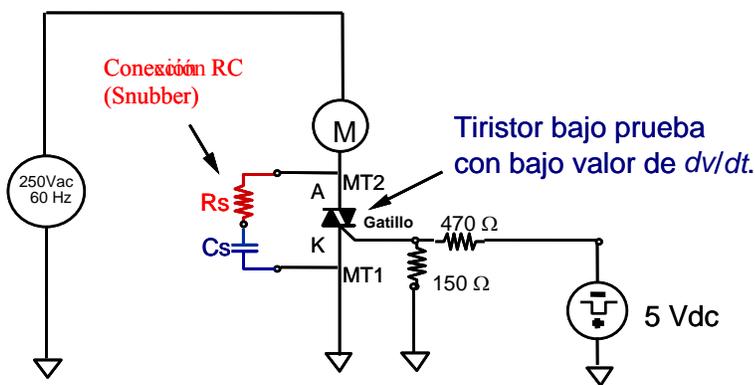
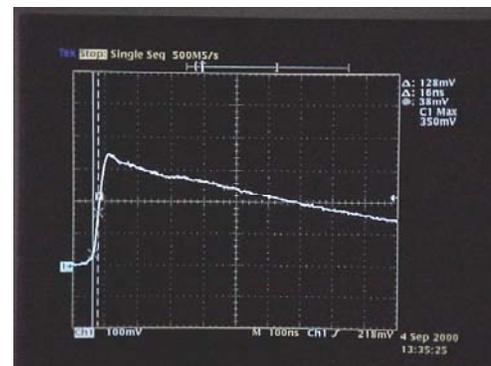


Fig. 4.5. Circuito de prueba de di/dt .



Dispositivo : MAC997A8, Snubber : C = 10 nF, R = 75 Ohms
Lectura: $di/dt = \Delta I / \Delta t$. $di/dt = 80.0$ A/ μ sec

Fig. 4.6. Lecturas de di/dt en trazador de curvas.

Línea de Producto	Tipo de Tiristor	Dimensiones del dado	Maximos valores para Prueba	
			IPK (Amp)	di/dt (Amp/usec)
TL 670	SCR	92x92mils	24	60
TL 675	SCR	92x92mils	24	60
TL 675B	SCR	92x92mils	24	60
TL 672	SCR	150x150mils	44	105
TL 672S	SCR	150x150mils	44	105
TL 685	SCR	180x180mils	74	105
TL 690	SCR	210x210mils	104	103
TL 977	TRIAC	120x120mils	30	22
TL 977N	TRIAC	120x120mils	30	22
TL 986	TRIAC	120x120mils	30	22
TL 986N	TRIAC	120x120mils	30	22
TL 986S	TRIAC	120x120mils	30	22
TL 981	TRIAC	150x150mils	30	22
TL 981L	TRIAC	150x150mils	30	22
TL 981N	TRIAC	150x150mils	30	22
TL 985	TRIAC	180x180mils	80	25
TL 990	TRIAC	210x210mils	80	25

Tabla 4.1. Valores de IPK y di/dt dependiendo del tamaño de dado y línea fuente.

Numero de Arreglo R,L,C,	Resistencia (Ohms)	Inductancia (uH)	Capacitor (uF)	IPK (Amp)	di/dt (A/usec)
1	10.00	0.01	6.00	13.00	18.00
2	5.00	0.01	8.00	30.00	22.00
3	3.60	9.16	1.00	80.00	25.00
4	5.00	0.01	6.00	24.00	60.00
5	10.40	0.30	3.00	24.00	108.00
6	6.95	0.90	3.00	34.00	98.00
7	5.22	1.00	3.00	44.00	105.00
8	3.95	1.20	3.00	57.00	97.00
9	2.90	1.20	3.00	74.00	105.00
10	2.09	1.40	3.05	104.00	103.00

Tabla 4.2. Valores de R, L, C para la prueba específica de di/dt .

4.4 Resultados de las Pruebas Dinámicas: [1,5,10]

4.4.1 Comparación de resultados de pruebas dinámicas entre grupos

En la tabla 4.3 se muestra un resumen de los resultados de ambas pruebas, di/dt y dv/dt . En los párrafos siguientes, se exponen los resultados individuales de cada prueba y grupo.

- Las principales pruebas aplicadas fueron dv/dt y di/dt . Ambas pruebas se hicieron en el laboratorio de aplicaciones.
- Como puede verse, en el caso de di/dt el grupo de control falló en la última prueba, en la condición de 361 A/ μ sec, a los 18,000 ciclos. La corriente di/dt se fue incrementando en cada corrida hasta que se determinara el primer fallo. Se hicieron seis corridas, con un total de 108,000 ciclos. En este caso el Grupo de Prueba (Gatillo en la Esquina), mostró un desempeño superior que el grupo normal. Se toma como valor final 361 A/ μ sec, valor muy superior al de la especificación eléctrica del grupo de control que es de 50 A/ μ sec.
- En el caso de dv/dt , los resultados fueron evaluados por grupos con 20 unidades cada uno. Se puede ver que el Grupo de Control mostró una media de 512 V/ μ sec y el grupo de Prueba T1 con condiciones normales de proceso y mismas que las del Grupo de Control mostró un dv/dt de solo 418 V/ μ sec. Los grupos T2 y T3 mostraron un comportamiento superior aún sobre el grupo de Control y T1, mostrando que las recetas a usar en la futura producción en masa de este nuevo dispositivo serían las condiciones de T2 y T3, con valores de dv/dt de 577 V/ μ sec y 910 V/ μ sec respectivamente.
- Nuevamente los grupos de prueba mostraron mejor desempeño, ahora limitados a T2 y T3.

Caracterización Dinámica

di/dt (25 °C)	A/ μ sec	102	145	212	258	303	361
Control	15 unidades	0	0	0	0	0	1 falla
Prueba T1	15 unidades	0	0	0	0	0	0
Prueba T2	15 unidades	0	0	0	0	0	0
Prueba T3	15 unidades	0	0	0	0	0	0
dv/dt (125 °C)	V/ μ sec	Media	STDEV	Min	Max		
Control	20 unidades	512	39	428	612		
Prueba T1	20 unidades	418	42	329	501		
Prueba T2	20 unidades	577	75	475	734		
Prueba T3	20 unidades	910	102	758	1168		

Tabla 4.3 Resumen de Caracterización Dinámica.

En las tablas 4.4 a 4.11 se dan los resultados individuales de cada prueba por grupo.

4.4.2 Resultados de dv/dt , realizada a alta temperatura, $T= 125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 4.4 Prueba dv/dt , $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, grupo de control.

Tabla 4.5 Prueba dv/dt , $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, grupo de evaluación T1

Tabla 4.6 Prueba dv/dt , $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, grupo de evaluación T2

Tabla 4.7 Prueba dv/dt , $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, grupo de evaluación T3

4.4.3 Resultados de di/dt , realizada a temperatura ambiente, $T= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 4.8 Prueba di/dt , grupo de control.

Tabla 4.9 Prueba di/dt , grupo de evaluación T1

Tabla 4.10 Prueba di/dt , grupo de evaluación T2

Tabla 4.11 Prueba di/dt , grupo de evaluación T3

**FORMAT FOR CHARACTERIZATION OF SCRS AND TRIACS
(dv/dt)**

DEVICE NAME : MCR8 (TL608)

REQUEST No.

GROUP: CONTROL

REQUIRED DATE :

TEMPERATURE : 125°C

FINISHED DATE :MARZO /13 /
00

VOLTAJE : 800V

DONE BY : DALILA RAMIREZ

RGK : N/A

SNUBBER R : N/A
C : N/A

UNIT NUMBER	VMT2 (+)			UNIT NUMBER	VMT2(-)		
	AV (Volts)	At (μ sec)	dv/dt (Volt/ μ sec)		AV (Volts)	At (μ sec)	dv/dt (Volt/ μ sec)
1	424	0.781	543				
2	424	0.693	612				
3	424	0.809	524				
4	424	0.889	477				
5	424	0.791	536				
6	424	0.773	549				
7	424	0.805	527				
8	424	0.843	503				
9	424	0.802	529				
10	424	0.836	507				
11	424	0.826	513				
12	424	0.855	496				
13	424	0.839	505				
14	424	0.959	442				
15	424	0.874	485				
16	424	0.836	507				
17	424	0.772	549				
18	424	0.990	428				
19	424	0.861	492				
20	424	0.824	515				

AVG			512				
STDEV			39				
MAX			612				
MIN			428				

Tabla 4.4. Prueba dv/dt , 125 °C, grupo de control.

**FORMAT FOR CHARACTERIZATION OF SCRS AND TRIACS
(dv/dt)**

DEVICE NAME : MCR8 (TL608)

REQUEST No.

GROUP: EVALUATION 1

REQUIRED DATE :

TEMPERATURE : 125°C

FINISHED DATE :MARZO /13 /
00

VOLTAJE : 800V

DONE BY : DALILA RAMIREZ

RGK : N/A

SNUBBER R : N/A
C : N/A

UNIT NUMBER	VMT2 (+)			UNIT NUMBER	VMT2 (-)		
	AV (Volts)	At (μ sec)	dv/dt (Volt/ μ sec)		AV (Volts)	At (μ sec)	dv/dt (Volt/ μ sec)
26	424	0.846	501				
27	424	1.074	395				
28	424	1.035	410				
29	424	1.084	391				
30	424	1.000	424				
31	424	0.954	444				
32	424	0.936	453				
33	424	1.188	357				
34	424	1.288	329				
35	424	1.141	372				
36	424	0.902	470				
37	424	1.045	406				
38	424	1.032	411				
39	424	0.903	470				
40	424	0.943	450				
41	424	0.925	458				
42	424	0.991	428				
43	424	1.050	404				
44	424	1.059	400				
45	424	1.110	382				

AVG			418				
STDEV			42				
MAX			501				
MIN			329				

Tabla 4.5. Prueba dv/dt , 125 °C, grupo de evaluación T1.

**FORMAT FOR CHARACTERIZATION OF SCRS AND TRIACS
(dv/dt)**

DEVICE NAME : MCR8 (TL608)

REQUEST No.

GROUP: EVALUATION 2

REQUIRED DATE :

TEMPERATURE : 125°C

FINISHED DATE :MARZO /13 /
00

VOLTAJE : 800V

DONE BY : DALILA RAMIREZ

RGK : N/A

SNUBBER R : N/A
C : N/A

UNIT NUMBER	VMT2 (+)			UNIT NUMBER	VMT2(-)		
	AV (Volts)	At (µsec)	dv/dt (Volt/µsec)		AV (Volts)	At (µsec)	dv/dt (Volt/µsec)
51	424	0.693	612				
52	424	0.687	617				
53	424	0.727	583				
54	424	0.804	527				
55	424	0.776	546				
56	424	0.578	734				
57	424	0.767	553				
58	424	0.810	523				
59	424	0.703	603				
60	424	0.792	535				
61	424	0.892	475				
62	424	0.828	512				
63	424	0.591	717				
64	424	0.876	484				
65	424	0.613	692				
66	424	0.823	515				
67	424	0.829	511				
68	424	0.668	635				
69	424	0.682	622				
70	424	0.786	539				

AVG			577				
STDEV			75				
MAX			734				
MIN			475				

Tabla 4.6. Prueba dv/dt , 125 °C, grupo de evaluación T2.

**FORMAT FOR CHARACTERIZATION OF SCRS AND TRIACS
(dv/dt)**

DEVICE NAME : MCR8 (TL608)

REQUEST No.

GROUP: EVALUATION 3

REQUIRED DATE :

TEMPERATURE : 125°C

FINISHED DATE :MARZO /13 /

VOLTAJE : 800V

00

RGK : N/A

DONE BY : DALILA RAMIREZ

**SNUBBER R : N/A
C : N/A**

UNIT NUMBER	VMT2 (+)			UNIT NUMBER	VMT2(-)		
	AV (Volts)	At (μsec)	dv/dt (Volt/μsec)		AV (Volts)	At (μsec)	dv/dt (Volt/μsec)
76	424	0.480	883				
77	424	0.458	926				
78	424	0.479	885				
79	424	0.433	979				
80	424	0.549	772				
81	424	0.471	900				
82	424	0.468	906				
83	424	0.559	758				
84	424	0.542	782				
85	424	0.363	1168				
86	424	0.509	833				
87	424	0.445	953				
88	424	0.495	857				
89	424	0.465	912				
90	424	0.403	1052				
91	424	0.485	874				
92	424	0.395	1073				
93	424	0.514	825				
94	424	0.468	906				
95	424	0.445	953				

AVG			910				
STDEV			102				
MAX			1168				
MIN			758				

Tabla 4.7. Prueba *dv/dt*, 125 °C, grupo de evaluación T3.

Caracterización di/dt					
Dispositivo: MCR8N (diseño Vgate)					
Grupo: CONTROL					
Número de ciclos por TEST: 18,000					
TEST1 C=1.7µF L=0.15µH R=2.5 Ohms IPK= 75A IGT=100mA PW= 20µsec di/dt = 102 A/µsec			TEST2 C=1.7µF L=0.15µH R=3.5 Ohms IPK= 77A IGT=100mA PW= 25µsec di/dt = 145 A/µsec		
GOODS: 15 BADS: 0			GOODS: 15 BADS: 0		
TEST3 C=1.7µF L=0.15µH R=5 Ohms IPK= 90A IGT=100mA PW= 30µsec di/dt = 212 A/µsec			TEST4 C=1.7µF L=0.15µH R=9 Ohms IPK= 95A IGT=100mA PW= 23µsec di/dt = 258 A/µsec		
GOODS: 15 BADS: 0			GOODS: 15 BADS: 0		
TEST5 C=1.0µF L=0.15µH R=8 Ohms IPK= 98A IGT=100mA PW= 27µsec di/dt = 303 A/µsec			TEST6 C=1.0µF L=0.15µH R=7.5 Ohms IPK= 114A IGT=100mA PW= 28µsec di/dt = 361 A/µsec		
GOODS: 15 BADS: 0			GOODS: 14 BADS: 1		

Tabla 4.8. Prueba di/dt , grupo de control.

Caracterización di/dt					
Dispositivo: MCR8N (diseño Vgate)					
Grupo: PRUEBA 1					
Número de ciclos por TEST: 18,000					
TEST1 C=1.7µF L=0.15µH R=2.5 Ohms IPK= 75A IGT=100mA PW= 20µsec di/dt = 102 A/µsec			TEST2 C=1.7µF L=0.15µH R=3.5 Ohms IPK= 77A IGT=100mA PW= 25µsec di/dt = 145 A/µsec		
GOODS: 15 BADS: 0			GOODS: 15 BADS: 0		
TEST3 C=1.7µF L=0.15µH R=5 Ohms IPK= 90A IGT=100mA PW= 30µsec di/dt = 212 A/µsec			TEST4 C=1.7µF L=0.15µH R=9 Ohms IPK= 95A IGT=100mA PW= 23µsec di/dt = 258 A/µsec		
GOODS: 15 BADS: 0			GOODS: 15 BADS: 0		
TEST5 C=1.0µF L=0.15µH R=8 Ohms IPK= 98A IGT=100mA PW= 27µsec di/dt = 303 A/µsec			TEST6 C=1.0µF L=0.15µH R=7.5 Ohms IPK= 114A IGT=100mA PW= 28µsec di/dt = 361 A/µsec		
GOODS: 15 BADS: 0			GOODS: 15 BADS: 0		

Tabla 4.9. Prueba di/dt , grupo de evaluación T1.

Caracterización di/dt Dispositivo: MCR8N (diseño Vgate) Grupo: PRUEBA 2 Número de ciclos por TEST: 18,000	
TEST1 C=1.7μF L=0.15μH R=2.5 Ohms IPK= 75A IGT=100mA PW= 20μsec di/dt = 102 A/μsec	TEST2 C=1.7μF L=0.15μH R=3.5 Ohms IPK= 77A IGT=100mA PW= 25μsec di/dt = 145 A/μsec
GOODS: 15 BADS: 0	GOODS: 15 BADS: 0
TEST3 C=1.7μF L=0.15μH R=5 Ohms IPK= 90A IGT=100mA PW= 30μsec di/dt = 212 A/μsec	TEST4 C=1.7μF L=0.15μH R=9 Ohms IPK= 95A IGT=100mA PW= 23μsec di/dt = 258 A/μsec
GOODS: 15 BADS: 0	GOODS: 15 BADS: 0
TEST5 C=1.0μF L=0.15μH R=8 Ohms IPK= 98A IGT=100mA PW= 27μsec di/dt = 303 A/μsec	TEST6 C=1.0μF L=0.15μH R=7.5 Ohms IPK= 114A IGT=100mA PW= 28μsec di/dt = 361 A/μsec
GOODS: 15 BADS: 0	GOODS: 15 BADS: 0

Tabla 4.10. Prueba *di/dt*, grupo de evaluación T2.

Caracterización di/dt Dispositivo: MCR8N (diseño Vgate) Grupo: PRUEBA 3 Número de ciclos por TEST: 18,000	
TEST1 C=1.7μF L=0.15μH R=2.5 Ohms IPK= 75A IGT=100mA PW= 20μsec di/dt = 102 A/μsec	TEST2 C=1.7μF L=0.15μH R=3.5 Ohms IPK= 77A IGT=100mA PW= 25μsec di/dt = 145 A/μsec
GOODS: 15 BADS: 0	GOODS: 15 BADS: 0
TEST3 C=1.7μF L=0.15μH R=5 Ohms IPK= 90A IGT=100mA PW= 30μsec di/dt = 212 A/μsec	TEST4 C=1.7μF L=0.15μH R=9 Ohms IPK= 95A IGT=100mA PW= 23μsec di/dt = 258 A/μsec
GOODS: 15 BADS: 0	GOODS: 15 BADS: 0
TEST5 C=1.0μF L=0.15μH R=8 Ohms IPK= 98A IGT=100mA PW= 27μsec di/dt = 303 A/μsec	TEST6 C=1.0μF L=0.15μH R=7.5 Ohms IPK= 114A IGT=100mA PW= 28μsec di/dt = 361 A/μsec
GOODS: 15 BADS: 0	GOODS: 15 BADS: 0

Tabla 4.11. Prueba *di/dt*, grupo de evaluación T3.

Resumen:

En este capítulo se mostro las principales pruebas dinámicas que se aplican a los tiristores. Se cubrio las bases y las definiciones para las pruebas dv/dt y di/dt y su realización. Se probarón todos los grupos del experimento tanto en pruebas estaticas, dv/dt y di/dt , todas las pruebas dieron mejora con respecto al grupo de comparación. Se obtuvieron lecturas individuales para pruebas estáticas en cien unidades por grupo. Los resultados obtenidos muestran una mejora en el proyecto de gatillo en la esquina, y se establecieron cuales eras las mejores condiciones de proceso para la producción en masa de estos nuevos dispositivos.

CAPITULO 5

Conclusiones

- El diseño propuesto con gatillo en la esquina y dedos extendidos dieron el resultado esperado según la evaluación de los parámetros de dv/dt y di/dt .
- Se vio que para la producción en masa, la cuestión del costo es viable y sin ningún obstáculo.
- El proceso tecnológico utilizado para hacer un gatillo en la esquina, es el mismo que el proceso normal para los tiristores con gatillo en el centro y en la orilla. Esto demuestra que los procesos tecnológicos de obleas pueden llegar a ser muy flexibles y permitir la introducción de nuevos dispositivos en tiempos cortos.
- Los cambios en el proceso normal fueron solo en mascarillas, para las cuales se quería influenciar en la parte frontal de la oblea semiconductora, manteniendo las mismas mascarillas para el resto de los procesos de fotolitografía.
- Las diferentes recetas existentes en las áreas de obleas permitieron introducir variabilidad de parámetros en la evaluación del proyecto. Variando tiempos de difusión seleccionados de los ya existentes permitió tener grupos representativos para asegurar que se tendrían varios valores de procesos diferentes.
- Los parámetros eléctricos mostraron una mejora significativa en el diseño propuesto, mejorando fugas y voltajes dependiendo del grupo de evaluación.
- En el proceso de backend no se ocupó de nada diferente en el flujo de las operaciones consecutivas de los dispositivos de línea, para lograr el ensamble de los dispositivos prototipo. La especificación eléctrica de prueba final fue la única variación. Pero ésta es normal que sea diferente para los diferentes dispositivos eléctricos, dentro de los procesos habituales en Motorola (ON Semiconductor).
- En base a los resultados expuestos, se recomienda que el grupo de prueba del gatillo en la orilla es factible, práctico y económico de construir e incluir en el portafolio de la empresa. También, este dispositivo resuelve problemas de estabilidad en respuesta de di/dt , y dv/dt y presenta mejor desempeño eléctrico.
- Se recomienda el uso de las condiciones de los grupos T2 y T3 de prueba para su ensamble en masa en el área de obleas.

Recomendaciones para futuros experimentos de mejora de esta tesis:

- Como un proyecto posterior se recomienda que se evalúe este nuevo diseño de gatillo en empaquetados más pequeños que el TO-220AB. Como por ejemplo el TO-92, C-77 que son empaquetados más pequeños pero del mismo grupo conocidos como de PTH (pin thru hole). Estos empaquetados son muy usados en la industria actual. El uso de empaquetados más pequeños afectará la dimension del dado de silicio, lo cual requerirá de estudios posteriores en el área de obleas para dados menores a 100 milésimas.
- Se recomienda evaluar este nuevo dispositivo en otras series de voltajes, por ejemplo menores a 100 Volts, menores a 200 Volts, para ser usados también en empaquetados de TO-220AB, TO-92, C-77, etc.
- Para completar la serie, se recomienda que también se estudie el uso de estos nuevos dados en empaquetados de montaje superficial, como son los SOT-23, SC-59, SMA, SMB, y SMC. Estos requerirán de dimensiones en el silicio mucho más pequeñas de las que se han estado mencionando.
- Se recomienda evaluar un nuevo dispositivo semiconductor que tenga los dedos del gatillo rodeando el resto de las caras del cuadrado y cerrando el contacto del gatillo. Se podría esperar que el desempeño de éste fuera muy superior al presente proyecto.

BIBLIOGRAFIA

1. ON Semiconductor, "Thyristor Device Data", DL137/D Rev 7. May-2000. TRIACS, SCRs, Surge Surge Suppressors, and Triggers. ON Semiconductor.
2. Adolph Blicher, "Thyristor Physics", Springer-Verlag, 1976.
3. Paul D. Taylor. "Thyristor Design and Realization", John Wiley & sons, 1987.
4. S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2nd Edition, John Wiley & sons, 1981.
5. Alfredo Reyes, "Física de Dispositivos II, notas de clase de Maestría", Cinvestav, México, 1998.
6. Holger T. Grahn. "Introduction to Semiconductor Physics", World Scientific, 2001.
7. Salomón Ledezma. "Notas del proceso tecnológico de tiristores en ON Semiconductor", Tomadas en el periodo de 1997 – 2000.
8. M. Gamboa, H. Reynel, M. Salazar, M. Garcia. "Introducción a la Física Electrónica", IPN, 2001, Segunda Reimpresión.
9. M. Estrada, A. Cerdería, R. Martínez, "Circuitos Integrados", Pueblo y Educación, 1987
10. E. Saucedo, "Diseño de SCR", Notas, 1998 – 1999.
11. Sorab K. Ghandhi, "Semiconductor Power Devices, physics of operation and fabrication technology", chapter 5, John Wiley & Sons, New York, 1977.
12. R.K. Sugandhi, K.K. Sugandhi, "Tiristores, conceptos y aplicaciones", Limusa, México, 1994.
13. Raymond Ramshaw, "Electrónica de Potencia, controlada por Tiristores para motores eléctricos", Marcombo, Barcelona, 1982.
14. Henri Lilen, "Tiristores y Triacs", Alfaomega-Marcombo, México, 1996.
15. Wolfgang Weiske, "Curvas características del Tiristor, ep26", Siemens-Marcombo, 1989.
16. Hansjochen Benda, "Funcionamiento del Tiristor, ep28", Siemens-Marcombo, 1989.