

**RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LAS PROTECCIONES PERIFÉRICAS
JTE PARA EL SOSTENIMIENTO DE LA TENSIÓN EN RÉGIMEN INVERSO DE
UN DIODO EN SIC-4H**

JUAN-CARLOS RINCÓN SANTAMARÍA
En colaboración con el tema D de CEGELY

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA**

2004

**RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LAS PROTECCIONES PERIFÉRICAS
JTE PARA EL SOSTENIMIENTO DE LA TENSIÓN EN RÉGIMEN INVERSO DE
UN DIODO EN SIC-4H
(Febrero – Julio 2204)**

JUAN-CARLOS RINCÓN SANTAMARÍA
En colaboración con el tema D de CEGELY

**Proyecto de Grado para optar al título de
Ingeniero Electricista**

Profesor Tutor: Alain AUBERT
Ingeniero electricista
Responsable en CEGELY: D. Planson
Ingeniero Electricista

ETI, Año 2003 - 2004

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2004



Me llegó una palabra de Yahvé: "Antes de formarte en el seno de tu madre, ya te conocía; antes de que tú nacieras, yo te consagré, y te destiné a ser profeta de las naciones. "Yo exclamé: "Ay, Señor, Yahvé, ¡cómo podría hablar yo, que soy un muchacho!" Y Yahvé me contestó: "No me digas que eres un muchacho. Irás adondequiera que te envíe, y proclamarás todo lo que yo te mande. No les tengas miedo, porque estaré contigo para protegerte, palabra de Yahvé."



RECONOCIMIENTOS

A todo el equipo SiC de CEGELY.

D. PLANSON

J.P. CHANTE

C. RAYNAUD

M. LAZAR



CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. ESTADO DEL ARTE	3
1.1 PRESENTACIÓN DEL CARBURO DE SILICIO	3
1.2 HISTORIA	4
1.3 APLICACIONES ACTUALES	6
1.3.1 Abrasivo	6
1.3.2 Semiconductor	6
2. PRESENTACIÓN DE CEGELY Y DE LA COMUNIDAD SIC Y SU TRAYECTORIA EN DEP SIC	10
2.1 EL ESTADO DEL ARTE DE LA FABRICACIÓN: LAS VARIABLES EN JUEGO	10
2.2 DOPAJE LOCALIZADOR POR IMPLANTACIÓN IÓNICA	12
2.2.1 Los niveles de energía donadores y aceptadores	13
2.3 RECOCIDO POST-IMPLANTACIÓN	14
3. PRESENTACIÓN DE LAS PROTECCIONES PERIFÉRICAS	17
3.1 JUNCIONES AISLADAS O MESA	18
3.1.1 Mesa	18
3.2 PROTECCIONES “planas”	18
3.2.1 Anillos de guarda	18
3.2.2 Electrodo o placas de campo	18
3.2.3 Bolsa	19



4. PRESENTACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS DISPOSITIVOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA SIC	20
4.1 EL DIODO	20
4.2 EL MOSFET	21
EL MESFET	22
4.4 EL ,JFET	22
4.5 HACIA LOS CIRCUITOS INTEGRADOS	22
5. METODOLOGÍA	24
5.1 EL PORGRAA MEDICITM Y LA SIMULACIÓN ELECTRICA	24
5,1 .1 Descripción general	24
5.1.2 Presentación de los diferentes modelos y parámetros utilizados por MEDICITM	27
5.2 PRESENTACION DE LA JTE PARA UN DIODO 7500 V-1 D	29
5.2.1 El modelo del diodo 10	29
5.2.2 El diodo 20	35
6. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN	39
6.1 EL PERFIL DE DOPAJE VARIABLE	39
6.2 LA MONOBOLSA	43
6.3 LAS TRES BOLSAS	47
7. CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFIA	53



LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Acomodación de capas compactas E ó O sobre una capa A	3
Figura 2. Representación de la acomodación de los átomos de Si y O para el SiC-4H	4
Figura 3. Crecimiento de los cristales de SiC par sublimación	5
Figura 4 Observación a microscopio electrónico de los hoyos responsables de la ruptura en tensión prematura de diodos al aire a 300 K, después de una exposición a KOH, (a) falla elipsoidal, (b) falla circular	11
Figura 5. Esquematización de una implantación iónica a través de una mascara	13
Figura 6. Observación a microscopio óptico de un diodo fabricado en CEGELY después del recibido y antes de la metalización, presentando fisuras propagándose a lo largo de los ejes cristalográficos	16
Figura 7. Diferentes protecciones periféricas: (a) anillos de guarda, (b) placas de campo, (c) estructura mesa, (d) extensión lateral de la unión implantada (JTE)	17
Figura 8. Estado del arte de los dispositivos de electrónica de potencia SiC	23
Figura 9. Líneas de campo eléctrico máximo en el momento de ruptura alrededor de la interfaz entre la primera y la segunda bolsa. Simulación MEDICITM. Visualización TV2D	26
Figura 10 Esquema del símbolo eléctrico (a) de la estructura pm (b) y de su circuito eléctrico de prueba (c)	29



Figura 11. Característica tensión corriente del diodo PiN simulado en régimen inverso	30
Figura 12. Perfil del campo eléctrico para una unión abrupta truncada	31
Figura 13. Característica 1 (V) del diodo 1 D polarizado en directa	33
Figura 14. Corte vertical de la concentración de electrones para diferentes tensiones VAKa 1, 2 y 3 V	33
Figura 15. Corte vertical de la concentración de hoyos para diferentes tensiones VAKa 1, 2 y 3	34
Figura 16. Sección transversal de la estructura del diodo bipolar cilíndrico protegido por JTE	35
Figura 17. Estructura doble implantación propuesta por V.A.K. TEMPLE y W. TANTRAPQRN	36
Figura 18. Estructura periférica multi regiones mono unión propuesta por HAMZA YILMAZ	36
Figura 19. Repartición espacial de bolsa obtenida por la técnica de variación lateral de dopaje (VLD) propuesta por R. STENGL, U. GOSELE et al [14]	37
Figura 20. Vista en corte del diodo protegido por una bolsa donde el perfil lateral es Gaussiano	40
Figura 21. Perfiles de concentración laterales para la bolsa. Corte transversal a 0,5 μ m	40
Figura 22. ampo máximo dentro de la unión. Profundidad: 1 μ m	41
Figura 23. Conservación de la tensión en función del pico de concentración	42
Figura 24. Definición de la estructura 2D simulada del diodo protegido por bolsa	43
Figura 25. Concentración de la bolsa. Corte a 0.5 μ m de profundidad	44
Figura 26. Conservación de la tensión en función de la dosis de la bolsa	45



Figura 27. Perfil lateral de la magnitud del campo eléctrico para diferentes dosis y longitudes de bolsa	46
Figura 28. La figura presenta la estructura bi-dimensional estudiada y los parámetros geométricos y tecnológicos necesarios en su descripción bajo MEDICI	47
Figura 29. Perfil de dopaje de una protección periférica a tres bolsas para la misma dosis en cada bolsa	48
Figura 30. Campo máximo en la unión. Profundidad: 1 μ m. Los picos de campo máximo se localizan en los cambios abruptos de dopaje	49



LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Esta tabla muestra las características eléctricas del SiC comparadas con otros materiales. Fecha: Octubre 1995	8
Tabla 2. Implantación de aluminio, fósforo y de nitrógeno en el SiC	15
Tabla 3. Influencia de la dosis sobre la conservación en tensión. Comparación para posibilidades a una bolsa t a tres bolsas. Dosis normalizada a 1013 cm^2	50



RESUMEN

TITULO: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LAS PROTECCIONES PERIFÉRICAS JTE PARA EL SOSTENIMIENTO DE LA TENSIÓN EN RÉGIMEN INVERSO DE UN DIODO EN SiC-4H*

Autor:

Juan-Carlos Rincon Santamaria, Pierre Brosselard, Dominique Planson, Mihai Lazar, Christophe Raynaud, Jean-Pierre Chante, Jean-Pierre Taboy
Centre de Génie Electrique de Lyon (CEGELY) INSA-Lyon, UMR 5005 CNRS, Bât. Léonard de Vinci, 20 av. Albert Einstein, F-69621 Villeurbanne, France
Corresponding author: pierre.brosselard@insa-lyon.fr**

Palabras claves:

Protecciones periféricas, Dispositivos, electrónica de potencia, carburo de silicio, JTE, bolsa.

Contenido

Este proyecto de fin de estudios se inscribe dentro de los trabajos de investigación del laboratorio Centro de Ingeniería Eléctrica de Lyon CEGELY, en lo que concierne a la aplicación del carburo de silicio SiC como material semiconductor para los dispositivos de electrónica de potencia. Las investigaciones actuales están orientadas hacia la búsqueda de tensiones de sostenimiento en régimen inverso de 5 a 10 kV. El objetivo de esta practica es la simulación de un diodo PiN con una tensión de ruptura de 7000 V. El posee la particularidad de ser protegido en su periferia por tres bolsas o JTE (Junction Termination Extension). El objetivo de esta practica es determinar los intervalos de dosis de implantación iónica y las longitudes de las diferentes bolsas teniendo en cuenta las limitaciones tecnológicas.

Un programa de cálculo que utiliza el método de los elementos finitos llamado MEDIC™ permite determinar las características eléctricas y las magnitudes físicas internas (campo eléctrico, concentración de portadores). La estructura es determinada con la ayuda de un mallado donde en cada punto la ecuación de Poissin y las ecuaciones de continuidad son calculadas.

La extensión del emisor ha sido simulada resolviendo, con la ayuda del simulador, el problema de la conservación de la tensión en la periferia por medio de tres bolsas. Los intervalos de dosis de implantación fueron obtenidos. La anterior conclusión se inscribe dentro de una teoría que quiere mostrar que tres bolsas permiten definir intervalos de implantación iónica más grandes que una sola bolsa. Se ha simulado el diodo con una capa de aislante sobre él: Aire, SiO₂. Para determinar el orden de las simulaciones, un plano de experiencias ha sido concebido.

Propiedad intelectual CEGELY-INSA Documento Confidencial

* Trabajo de Grado

Facultad de Ciencias Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. **Alain AUBERT



ABSTRACT

TITLE: PERIPHERY PROTECTION OF 4H-SiC POWER PIN DIODE USING VARIABLE JTE SIMULATION STUDY*

Author:

Juan-Carlos Rincon Santamaria,

Pierre Brosselard, Dominique Planson, Mihai Lazar, Christophe Raynaud, Jean-Pierre Chante, Jean-Pierre Taboy

Centre de Génie Electrique de Lyon (CEGELY) INSA-Lyon, UMR 5005 CNRS, Bât. Léonard de Vinci, 20 av. Albert Einstein, F-69621 Villeurbanne, France

Corresponding author: pierre.brosselard@insa-lyon.fr**

Content

This project of end of studies registers inside the works of investigation of the laboratory Center of Electric Engineering of Lyon CEGELY, concerning the application of the silicon carbide SiC like material semiconductor for the devices of electronic of power. The current investigations are guided toward the search of maintenance tensions in inverse régime from 5 to 10 kw. The objective of this he/she practices it is the simulation of a diode PiN with a tension of rupture of 7000 V. He possesses the particularity of being protected in their periphery by three bags or JTE (Junction Termination Extension). The objective of this he/she practices it is to determine the intervals of dois of ionic installation and the longitudes of the different bags keeping in mind the technological limitations.

A calculation program that uses the method of the called finite elements MEDICITM allows to determine the electric characteristics and the internal physical magnitudes (electric field, payees' concentration). The structure is determined with the help of a mallado where in each point the equation of Poissin and the equations of continuity are calculated.

The extension of the originator has been simulated solving, with the help of the pretender, the problem of the conservation of the tension in the periphery by means of three bags. The intervals of installation dose were obtained. The previous conclusion registers inside a theory that he/she wants to show that three bags allow to define bigger intervals of ionic installation that a single bag. The diode has been simulated with a layer of insulating soble him: Air, SiO₂. To determine the order of the simulations, a plane of experiences has been conceived.

* Work of Grade

**Ability of Sciences Fisicomecánicas. School of Electric, Electronic Engineering and of Telecommunications. Alain AUBERT



INTRODUCCIÓN

El silicio es el material semiconductor dominando la industria de la electrónica hoy. El carburo de Silicio (SiC) posee las propiedades físicas superiores para los dispositivos de potencia, comparado con el silicio. Un cambio de tecnología del silicio al carburo de silicio revolucionará la electrónica de potencia.

Hace más de treinta años que se adelantan investigaciones sobre el Arsenuro de Galio GaAs y no es sino hasta recientemente que ese material ha sabido imponerse en su mercado « nicho »: telecomunicaciones, RF. Esta es una historia que la comunidad SiC desea a todo precio evitar. La motivación para trabajar sobre el carburo de silicio concierne los mercados en los cuales el silicio ha alcanzado los límites impuestos por la naturaleza y no por la tecnología. La electrónica de potencia mide sus éxitos al obtener sistemas mas integrados para corrientes y tensiones mas elevadas.

Desde la creación del Grupo de electrónica de potencia GEPRa en 1991, reuniendo el Centro de Ingeniería eléctrica de Lyon CEGELY, el Laboratorio de Materiales y de ingeniería física LMGP, el laboratorio de física de los dispositivos semiconductores LPCS y el laboratorio de física de la materia LPM, numerosos estudios han permitido avanzar en los conocimientos sobre las propiedades del SiC. La optimización del diodo de potencia es una etapa indispensable para la continuación de los trabajos los cuales son el desarrollo de transistores (MOS, IGBT...).

Potentes programas de simulación permiten hoy reducir los proyectos industriales en costo y tiempo. Estudios de optimización le la concepción ayudados con las simulaciones por elementos finitos para diferentes dispositivos en el seno de



CEGELY muestran que la conservación de la tensión depende enormemente de la región periférica. Una solución llamada JTE ó Junction termination Extension, reposando sobre el principio de implantaciones de bolsas al borde de la junción a proteger muestra resultados prometedores: diodo 5kV. La meta de esta practica es optimizar un diodo PiN en SiC-4H conservando una tensión inversa de 7500 V con una protección a tres bolsas. Se quiere mostrar que una JTE a tres bolsas permite aumentar los errores de dosis de implantación de las bolsas en comparación a una protección monobolsa. Las simulaciones tienen en cuenta las dificultades tecnológicas de la implantación o difusión de átomos de aluminio en el SiC. Para este efecto nosotros utilizaremos un programa de simulación de las impurezas dopantes dentro del SiC (I_2SiC).

El primer capitulo presenta un estado del arte de la electrónica de potencia en SiC. El segundo capitulo expone la metodología. El tercer capitulo expondrá los resultados, el análisis y la interpretación.



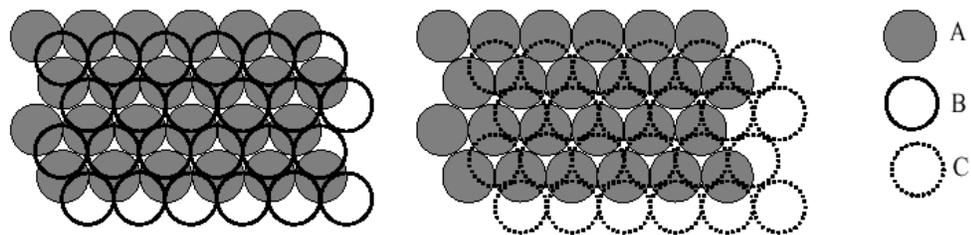
1. ESTADO DEL ARTE

El SiC es, en el estado del arte actual, el material mejor ubicado para la electrónica de potencia.

1.1 PRESENTACION DEL CARBURO DE SILICIO

El SiC no existe como un simple cristal sino como una familia de cristales llamada politipos. Los diferentes politipos no se diferencian por el numero de átomos de carbono o silicio sino por la manera como estos átomos son acomodados en capas. A los politipos se les da un nombre según la periodicidad de las capas (Figura 1).

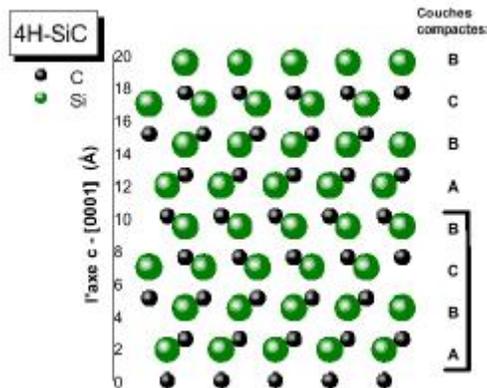
Figura 1. Acomodación de capas compactas B o C sobre una capa A



Por ejemplo, uno de los más conocidos es llamado 4H, lo que significa una red de tipo hexagonal compuesta de la repetición periódica de un motivo de 4 capas SiC (Figura 2).



Figura 2. Representación de la acomodación de los átomos de Si y C para el SiC-4H



En total existen más de 200 politipos donde algunos tienen periodicidades superiores a 100 capas atómicas. Las propiedades físicas exactas del SiC dependen de la estructura del cristal. Las estructuras más utilizadas son: 6H, 4H y 3C. La estructura 3C es la sola estructura cúbica (ella corresponde a la misma organización de los átomos que en el silicio o el diamante). Por encima de todo, son las propiedades electrónicas del SiC las que le dan su formidable potencial; capaz de despertar el entusiasmo de los espíritus más fríos.

1.2 HISTORIA

De hecho el carburo de silicio no es algo nuevo en escena y algunos dirán que él es el más viejo de todos los semiconductores. La primera mención del carburo de silicio remonta a 1824. Ella es debida al Sueco llamado Jöns Jacob Berzelius. En esa época, las propiedades y el potencial del material no eran conocidas. Ellos vinieron, con el desarrollo de los hornos eléctricos y el crecimiento del SiC por Acheson en 1885; Es él quien lo identifica como un siliciuro de carbono y quien le da el nombre de la fórmula química: SiC.

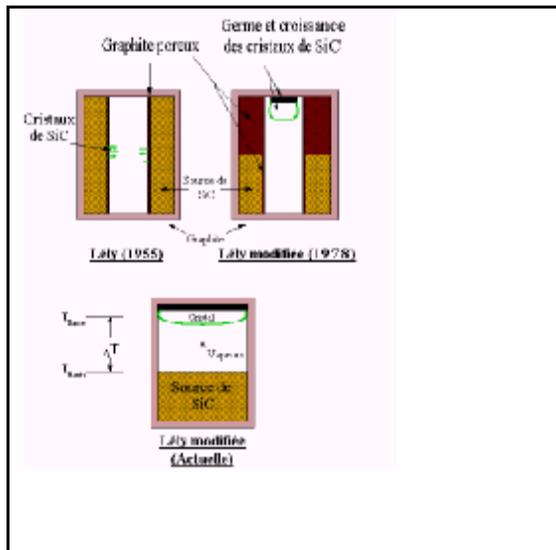
El SiC no existe sobre la tierra en estado natural, no se puede explotar en las minas como los otros minerales; de ahí la necesidad de utilizar hornos



complicados. La única existencia del SiC nos viene de los meteoritos. De hecho los mineralogos llaman a ese SiC natura, moisanita del nombre de quien lo descubrió primero en un meteorito en 1905.

La primera conferencia sobre el SiC tuvo lugar en Boston en 1958. Durante los años 60 y 70, la causa del SiC fue esencialmente sostenida por los científicos de la ex Unión Soviética. El año de 1978 atestigua un nuevo paso importante en el desarrollo del SiC: la utilización de germinadores en el proceso de crecimiento. Se trata, en efecto, de una mejora de la técnica propuesta por Lely la cual es aun conocida bajo el nombre de la “Técnica de Lely modificada” este cambio permite la fabricación de verdaderos cristales macizos (Figura 3).

Figura 3. Crecimiento de los cristales de SiC por sublimación



En 1987 fue fundada la sociedad CREE Research la cual es, hoy aún, líder en la fabricación de sustratos comerciales de SiC.



1.3 APLICACIONES ACTUALES

1.3.1 Abrasivo. La primera aplicación del SiC fue la de abrasivo y herramienta de corte. Siendo él igualmente de una extrema dureza; el SiC forma los granos de ciertos “papeles lija” pero ya en 1907 fue fabricado el diodo electroluminiscente. El siguiente desarrollo importante tuvo lugar en 1955 cuando Lely propuso un nuevo concepto para hacer crecer el cristal a gran calidad. A partir de ese momento, el interés del carburo de silicio como material para la electrónica comienza a crecer.

1.3.2 Semiconductor. El SiC es un material semiconductor para gran potencia en la industria de la electrónica y la microelectrónica. El carburo de silicio es un material con el cual es posible sobrepasar los límites de las tecnologías tradicionales.

El SiC pertenece al grupo de los semiconductores de gran banda prohibida. Gracias a su gran banda prohibida, su campo de ruptura elevado y su buena conductividad térmica, el SiC es un material prometedor en el campo de la electrónica alta temperatura, alta potencia y alta frecuencia.

El carburo de silicio es un material semiconductor cuyas propiedades físicas son muy interesantes para las aplicaciones alta temperatura, alta frecuencia y alta potencia.

La conductividad térmica del SiC sobrepasa a la del cobre. Todo calor producido por un componente es por lo tanto rápidamente evacuado. El SiC es al igual un material químicamente inerte por lo que los dispositivos pueden funcionar en los medios más hostiles; su gran resistencia a las radiaciones es igualmente de una gran importancia en esta era espacial y nuclear. El puede ser usado en el corazón de centrales nucleares y puede ser montado en satélites [7,9].

Sus principales ventajas con respecto al silicio son:



Una banda de energía prohibida tres veces superior, lo que le permite alcanzar en régimen intrínseco hasta 1000° C, contra 300° C para el silicio. Esto implica, entre otras, que el material es menos sensible a la elevación de la temperatura; el continua siendo semiconductor a temperaturas donde el silicio es bastante conductor. No hay razones objetivas para que un dispositivo en SiC no pueda operar a 500° C, en cambio, el silicio esta lejos de poder acercarse a esta temperatura. Además, con una conductividad térmica tres veces más grande, el carburo de silicio es un material permitiendo la integración de dispositivos sobre una misma pastilla y el desarrollo de dispositivos y aplicaciones a fuerte potencia.

Un campo eléctrico crítico diez veces superior permite además evitar los riesgos de ruptura por avalancha para una tensión inversa dada y mejorar el compromiso sostenimiento de la tensión en inversa/caída de tensión en directa. El dopaje de la capa activa puede ser de alrededor cien veces más elevado y su espesor diez veces más delgado que en el silicio para una misma tensión inversa. Estas características son importantes triunfos para el SiC.

Gracias al carburo de silicio, será posible emplear la electrónica de potencia hasta un grado mucho más grande que el de hoy, por ejemplo para remplazar los conmutadores mecánicos en conmutadores electrónicos para redes de distribución. Nuevas aplicaciones permitirían reducir las perdidas eléctricas correspondientes a la potencia desarrollada por una central nuclear en Francia. Por otro lado las líneas de potencia de alta tensión que destruyen actualmente la belleza del paisaje y que son objeto de atentados en Colombia, podrán ser enterradas bajo tierra. Igual, la masa de un tren eléctrico puede ser reducida considerablemente.



Tabla 1. Esta tabla muestra las características eléctricas del SiC comparadas con otros materiales. Fecha: Octubre 1995

Parametro eléctrico	Si	GaAs	SiC-6H	SiC-4H	SiC-3C
Nivel de energia de Fermi [ev]	1,1	1,42	3,0	3,2	2,3
Campo Critico @ [MV/cm]	0,6	0,6	3,2	3,0	> 1,5
Mobilidad de los electrones @ 10^{16} cm ⁻³ [cm ² / V-s]	1100	6000	370	800	750
Velocidad de flujo de electrones en saturacion [cm/s]	10^7	10^7	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$
Conductividad termica [W/cm-K]	1,5	0,5	4,9	4,9	5,0
Mobilidad de hoyos @ 10^{16} cm ⁻³ [cm ² /V-s]	420	320	90	115	40
Wafer Comercial	12"	6"	1,175"	1,375"	Non

El dominio de aplicación del SiC para las grandes potencias esta plenamente justificado. "Es el material del futuro" que ha hecho volver al recuerdo los primeros tiempos del arsenuro de galio GaAs. Ningún nuevo tipo de diseño permitirá sobrepasar las simples leyes de la física, igual si a muchos les duele admitirlo. Es esta idea cortante la que motiva a continuar los trabajos a pesar de las inmensas dificultades tecnológicas que representa el SiC.



Por el momento el mercado es aun pequeño pero en la medida de los progresos tecnológicos sus dominios de aplicación podrían extenderse a todos aquellos que hoy son del silicio.



2. PRESENTACION DE CEGELY Y DE LA COMUNIDAD SIC Y SU TRAYECTORIA EN DEP SIC

El carburo de silicio se aproxima muy rápido a la madurez que le permitirá ubicarse en su lugar esperado al lado del silicio, sobre su propio mercado. La capacidad para soportar altas potencias y altas temperaturas hace del SiC un material bien adaptado para los sistemas “rectificadores”.

2.1 EL ESTADO DEL ARTE DE LA FABRICACION: LAS VARIABLES EN JUEGO

Al momento de tratar con el SiC, los científicos ya disponen de una gran riqueza de técnicas que, mediante algunas modificaciones, pueden ser utilizadas para fabricar dispositivos. Además, es igualmente cortante constatar que, a pesar de las diferencias en comparación al silicio, una parte importante de las propiedades químicas del SiC se parecen a las de los dos elementos, bien conocidos, que lo componen. Es, puede ser, esto más que el resto lo que suscita el interés de la comunidad de los semiconductores.

La última pregunta que la gente se hace es “¿donde estamos hoy?” puesto que es en general más fácil decir lo que será posible hacer que lo que verdaderamente se hace. Es hasta el final de los años ochenta que los desarrollos del carburo de silicio han verdaderamente ganado en potencia.

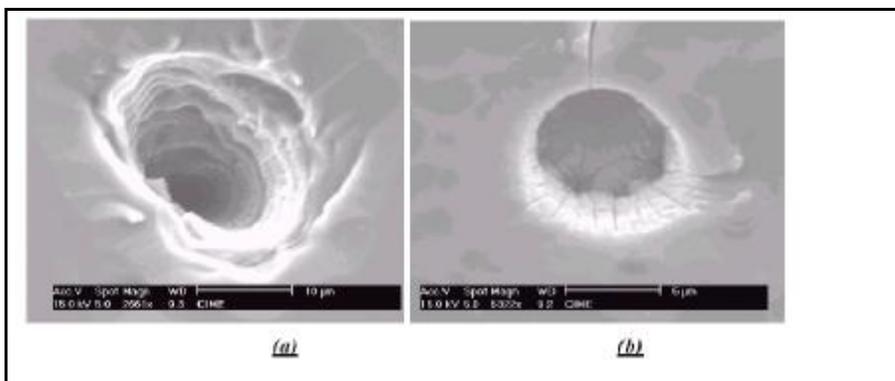
Desde allí los progresos han sido considerables. Con la disponibilidad de sustratos de gran talla, los desarrollos del carburo de silicio han explotado. Universidades, científicos, ingenieros y compañías trabajan en conjunto para resolver los problemas restantes del material. Los problemas tecnológicos que retrasan el desarrollo de los semiconductores de gran banda prohibida son los siguientes:



- **Los sustratos.** Muchos esfuerzos se han concentrado sobre la evolución de la talla de los sustratos. Hoy, CREE comercializa wafers de tres pulgadas de diámetro. Hay mejoras todavía a hacer sobre todo en términos de fallas como los micro túneles o dislocaciones. El obstáculo principal resta hoy aun en la síntesis del material, los grados de pureza y la calidad cristalina, debiendo ser relativamente buenos y repetitivos para asegurar que perdure la secuencia SiC.

Los alcances de los dispositivos semiconductores realizados en SiC están, evidentemente ligados a la calidad del sustrato. La primera dificultad proviene del compuesto natural SiC. El no puede ser sintetizado por el método de Czochralski puesto que sus componentes, Si y C, no se subliman bajo las presiones usuales. Hasta los años ochenta solo cristales de pequeña talla eran producidos, siguiendo las técnicas de la industria del abrasivo quien utilizaba el carburo de silicio bajo el nombre de carburo o carburundum. Los sustratos de CREE Research presentan aun fallas debido a fuertes problemas cristalinicos, a fallas de los germinadores o de la interfaz con los germinadores a dislocaciones a veces a incrustaciones de silicio o carbón. El impacto de estas fallas sobre el dispositivo es variable según la zona donde se encuentre y el volumen que ocupe (Figura 4).

Figura 4. Observación a microscopio electrónico de los hoyos responsables de la ruptura en tensión prematura de diodos al aire a 300 K, después de una exposición a KOH, (a) falla elipsoidal, (b) falla circular



- **Control de los dopajes tipo N y P.** Los consumidores, particularmente aquellos que analizan las fallas han podido remarcar que en el espacio de algunos μm de concepción defectuosa se podría arruinar completamente la conservación de la tensión [4].

- **Los dieléctricos.** Un problema importante que resta es la mala calidad del óxido de silicio fabricado sobre el SiC en comparación con el fabricado sobre el silicio, en particular, la rugosidad de la interfase provoca una degradación de la movilidad en el canal y por lo tanto una débil transconductancia [7]. Progresos significativos han sido, sin embargo, realizados en esta dirección, sobretodo depositando un dieléctrico mas que el óxido generado térmicamente.

- **Los contactos óhmicos.** Numerosos metales han sido ensayados para obtener buenos contactos óhmicos sobre el SiC (níquel, aluminio, titanio, tungsteno, platino, oro, cobre, paladio, niobio, molibdeno, tantalio). Los mas utilizados son el níquel y el tungsteno sobre el SiC tipo N, el aluminio y el titanio sobre el tipo P. La resistencias específicas de los contactos obtenidos son de alrededor 10^{-6} - 10^{-5} $\cdot \text{cm}^2$ para el níquel y el tungsteno sobre SiC-6H de tipo N dopado a 10^{19} cm^{-3} . Para el tipo P, se obtienen 10^{-5} - 10^{-4} $\cdot \text{cm}^2$ con aluminio o titanio sobre el SiC-4H o 6H dopado a 10^{19} cm^{-3} [1].

2.2 DOPAJE LOCALIZADO POR IMPLANTACION IONICA

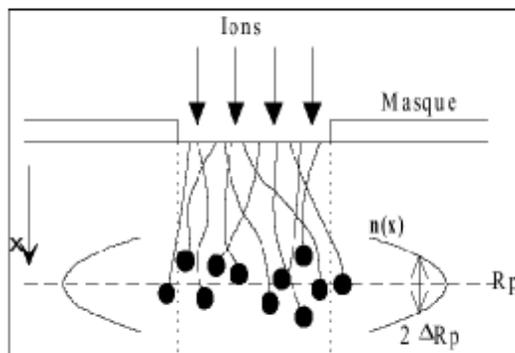
Al seno de CEGELY, la principal etapa de fabricación a ser optimizada es la implantación iónica la cual es la única técnica de dopaje local imaginable en el SiC para hacer uniones y bolsas. La implantación iónica es la técnica mas utilizada para la obtención de dopajes localizados. Las impurezas mas utilizadas son el aluminio y el boro para obtener el tipo P, El nitrógeno y recientemente el fósforo para el tipo N.



El principal inconveniente es, a imposibilidad de hacer difusión, el rango reducido de las profundidades de dopaje posible [1].

2.2.1 Los niveles de energía donadores y aceptadores. En efecto, el orden de magnitudes de la penetración de átomos de aluminio en el SiC es de 1 nm/keV (posición del máximo de la distribución de átomos en el SiC, R_p [nm], dividido por la energía de implantación, E [keV]). Para obtener una profundidad de implantación de aluminio de 1 μm , se necesita una energía de implantación del orden de 1 MeV. En consecuencia, es difícil técnicamente obtener uniones profundas, mayores a 1 μm , con los implantadores clásicos utilizados para el silicio cuando típicamente la energía máxima disponible es de 200 keV. La profundidad de penetración esta directamente ligada a la masa del proyectil o impureza, y a la densidad volumétrica del material objetivo (SiC, $3,21 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). El átomo de boro, más pequeño que el de aluminio, penetra alrededor de 2 nm/keV, el nitrógeno en las vecindades de 1,5 nm/keV. Para implantaciones profundas, se necesita: Sea implantar a alta energía, Sea disparar intencionalmente según una dirección cristalográfica privilegiada por donde la disposición de átomos de Si y de C crean canales (Figura 5).

Figura 5. Esquematización de una implantación iónica a través de una máscara



Otro inconveniente es el daño del material debido a la implantación, tradiciéndose en modificaciones locales de la estequiometría del SiC y en la alteración de su estructura cristalina.

2.3 RECOCIDO POST-IMPLANTACIÓN

Una etapa de recocido a alta temperatura es por lo tanto necesaria para recristalizar lo mejor posible el material y permitir a las impurezas implantadas migrar hacia un sitio cristalino adecuado para llegar a ser verdaderos dopantes [3]. El recocido puede ser efectuado en un recinto cerrado formado de un tubo de cuarzo en el cual un sostenedor soporta la plaqueta de SiC montada en una placa. La temperatura de recocido se sitúa entre 1300°C y 1800°C, durante 10 a 30 minutos (Figura 6). La siguiente tabla muestra algunos resultados de recocido para las implantaciones de nitrógeno, de fósforo y de aluminio.

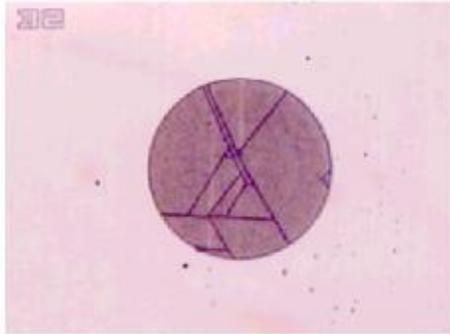


Tabla 2. Implantación de aluminio, fósforo y de nitrógeno en el SiC

Especie Implantada	Implantación			Condiciones de recocido	Dopaje químico [cm ⁻³]	n,p [cm ⁻³] (300K)	μ [cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹] (300K)	R□ [• /□]	Ref
	Dosis [cm ⁻²]	T [°C]							
Al	1,7×10 ¹⁵	20	6H	1700 °C/30min	4×10 ¹⁹		40	19000	[Laza'00]
Al	4×10 ¹⁵	20	4H	1700 °C/30min				95000	[Kimo'01]
	4×10 ¹⁵	500	4H	1700 °C/30min				3600	
N	4×10 ¹⁵	800	4H	1600 °C/30min				420	[Kimo'01]
N	1×10 ¹³	20	6H	1700°C/30min		2×10 ¹⁷	180	6700	[Laza'01]
N	4×10 ¹⁵	800	6H	1500°C/30min		~10 ¹⁹		500	[Kimo'97]
N	10 ¹⁵	650	6H	1300 °C/2min	5×10 ¹⁸	2×10 ¹⁸	100		[Thom'98]
	10 ¹⁵	650	6H	1300 °C/2min	5×10 ¹⁷	3×10 ¹⁷	200		
N	2×10 ¹⁵	650	6H	1300 °C/30min	8×10 ¹⁹	2×10 ¹⁸	85		[Gimb'99]
	2×10 ¹⁵	650	4H	1300 °C/30min	8×10 ¹⁹	1,7×10 ¹⁸	75		
		650	4H	1300 °C/30min	4×10 ¹⁷	1×10 ¹⁷	230	8000	
P	4×10 ¹⁵	20	4H	1700 °C/30min				105	[Kimo'01]
	4×10 ¹⁵	800	4H	1700 °C/30min				180	
P	7×10 ¹⁵	500	4H	1600 °C/30min	2×10 ²⁰			70	[Imai'00]



Figura 6. Observación a microscopio óptico de un diodo fabricado en CEGELY después del recibido y antes de la metalización, presentando fisuras propagándose a lo largo de los ejes cristalográficos



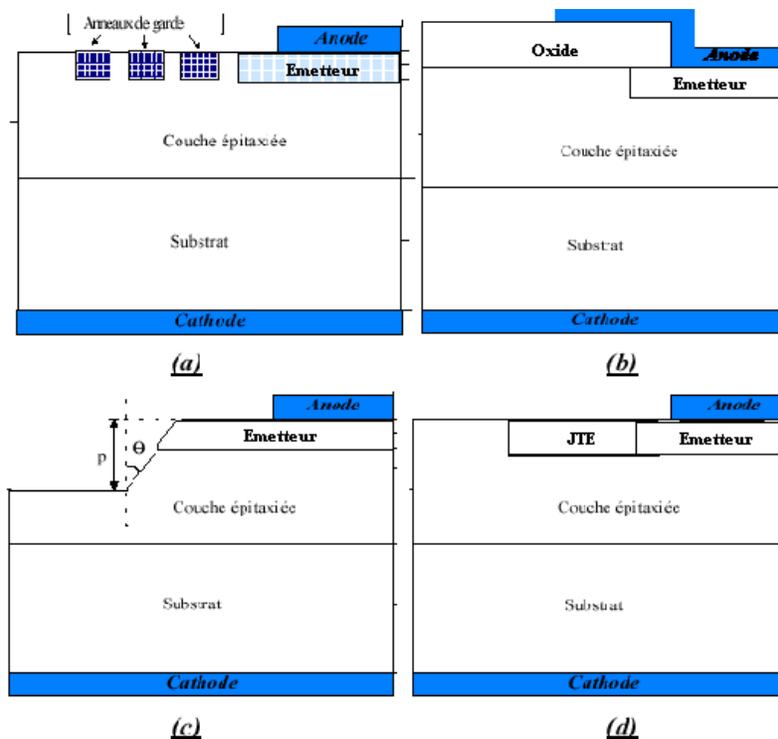
Los germinadores de epitaxio u otros tipos de recintos de alta temperatura pueden igualmente ser utilizados como hornos de recocido.



3. PRESENTACION DE LAS PROTECCIONES PERIFÉRICAS

El problema unidimensional de la conservación de la tensión se limita al espesor de la capa epitaxial. El problema extendido lateralmente concierne la interfase entre las zonas de dopajes diferentes y la interfaz de las uniones.

Figura 7. Diferentes protecciones periféricas: (a) anillos de guarda, (b) placas de campo, (c) estructura MESA, (d) extensión lateral de la unión implantada (JTE)



Las soluciones encontradas para la conservación de la tensión en la periferia se descomponen en dos grandes clases tecnológicas, las cuales expondré a continuación.

3.1 JUNCIONES AISLADAS O MESA

Junciones que necesitan una modificación local haciendo una sección parcial o incluso completa modificando así la estructura. Una intervención química es obligatoria cuando ella no es combinada de con tratamientos mecánicos como lijado, cepillado, aserradura.

3.1.1 Mesa. Consiste en efectuar un grabado de las zonas de fuerte campo eléctrico. El uso de la protección mesa ha dado resultados en los diodo concebidos en CEGELY [Lanois'97]. Problemas tecnológicos de sobregrabado por ejemplo, así como dificultades para concebirla en dispositivos no planos, han conducido al estudio de la protección periférica llamada « Junction Termination Extension »

3.2 PROTECCIONES « planas »

Junciones completamente realizables en una placa de SiC de espesor intercambiable. Se evita modificar la superficie de la placa con lo cual se conserva su integridad.

3.2.1 Anillos de guarda. Estos anillos son realizables por implantación a la vez que el emisor; o por grabado.

3.2.2 Electrodo o placas de campo. La prolongación de la metalización sobre el oxido permite una dilatación de las equipotenciales en la periferia del emisor. La eficacia de esta protección depende del espesor del oxido y de la extensión de la metalización. La calidad de la interfaz oxido/semiconductor y sobretudo la



cantidad de cargas presentes puede tener una influencia no despreciable sobre el efecto de la protección.

3.2.3 Bolsa. Nacida a principios de los años 80, su existencia es típica de la introducción de técnicas de microelectrónica por implantación iónica en zonas de dosis extremadamente precisas: de 10^{12} cm^{-2} a 10^{13} cm^{-2} átomos. En microelectrónica se utilizan profundidades de unión de algunos micrómetros utilizando el proceso de difusión para el silicio. JTE o bolsa son cajones del mismo tipo que la unión principal, pero menos dopados. Ellas se encuentran alrededor de la unión principal, a fin de dilatar las equipotenciales al nivel de la superficie del dispositivo.



4. PRESENTACION DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS DISPOSITIVOS DE ELECTRONICA DE POTENCIA SiC

Dispositivos han sido fabricados con los principales politipos 3C, 6H y 4H. El trabajo principal fue focalizado sobre el material 3C en razón de sus propiedades de transporte superior. Pero en razón de la débil calidad de los sustratos, la atención se ha girado hacia los politipos 6H y 4H.

4.1 EL DIODO

Fotodiodos al igual que LED's funcionando en el espectro ultravioleta han sido realizados. Estos últimos conocen el éxito comercial hace años. Los fotodiodos son de un interés particular puesto que ellos pueden funcionar en medios hostiles, una ventaja interesante es por ejemplo para controlar in-situ motores a combustión o control de satélites. Se ha mostrado que los fotodiodos en SiC pueden tener una sensibilidad de hasta cuatro órdenes de magnitud superior que a las del silicio. Los LED's a base de SiC son productos comerciales hace muchos años y se puede esperar que a ellos se les unan otros dispositivos en un futuro muy próximo.

Diodos tipo n-p y Schottky han sido producidos. Unrecord de 19 kV para un diodo PiN ha sido alcanzado por CREE (figura.8). Los diodos Schottky funcionan hasta 1 kV. Las temperaturas de funcionamiento sobrepasando 350°C han sido igualmente obtenidas.

Actualmente, diodos Schotky SiC son disponibles en el mercado. Los calibres de tensión son 600 y 1200 V para corrientes llegando hasta una decena de amperios. Ellos son comercializados por infineon, APT, Ferchaild, Microsemi y Rockwell.



Los prototipos de dispositivos de potencia presentes en la literatura confirman las potencialidades del material. Citemos el diodo bipolar en estructura mesa de Kordina et al., cuya conservación de tensión alcanza 4,5 kV, con una caída de tensión en régimen directo de 6 V a 100 A.cm^{-2} [Kordina'95]. La estructura plana de Rottner et al. Posee una conservación en tensión de 3,4 kV con una caída de tensión en directa de 4 V a 100 A.cm^{-2} [Rottner'97]. Este diodo es en SiC-4H y posee la particularidad de ser protegido en periferia por una doble extensión de la terminación de la unión. Este tipo de protección es la que se ha escogido para efectuar nuestro estudio. La mejor manera de evaluar la madurez de un material es examinando la capacidad de los dispositivos que el permite fabricar.

4.2 EI MOSFET

Un resultado importante de los primeros trabajos fue la fabricación de un MOSFET funcionando a 600°C [7]. Los transistores constituyen sin duda la más importante actividad de la microelectrónica moderna. En este campo, grandes esfuerzos se han concentrado sobre los dispositivos unipolares donde la conducción la asegura un solo tipo de portador. Esos dispositivos comprenden los transistores a efecto de campo bajo sus diferentes formas, JFET, MOSFET, MESFET. El MOSFET domina la tecnología a base de silicio. Es en el marco de la alta potencia y de la alta temperatura, de este mercado, que el SiC deberá triunfar.

El funcionamiento de un MOSFET de potencia a base de silicio esta limitado por su débil dopaje y su gran longitud necesaria para soportar el fuerte campo eléctrico [7]. De ello resulta una alta resistencia de tal dispositivo, lo que limita su capacidad de corriente. El mas grande campo de ruptura del SiC implica que esta resistencia puede ser reducida en dos ordenes de magnitud, dividido por 100.

Claramente el SiC tendrá un impacto mayor sobre el tamaño y la eficacia de los dispositivos de potencia.

4.3 EI MESFET

Los MESFET han recibido una atención particular debido a sus aplicaciones en sistemas de alta frecuencia y alta potencia. Ellos no necesitan los dieléctricos de gran calidad como los dispositivos MOS y pueden ser fabricados a dimensiones mucho más pequeñas. Aun más, las propiedades físicas y eléctricas del SiC le permiten alcanzar densidades de corriente mucho más grandes, lo que es ponderante para la generación de señales de radar o de telecomunicaciones móviles.

4.4 EI JFET

Dispositivos específicos han sido elaborados por CEGELY los cuales poseen capacidades eléctricas para la protección serie de circuitos [1,2]. El silicio no ofrece equivalente puesto que el dispositivo opera en condiciones no permitidas por este material.

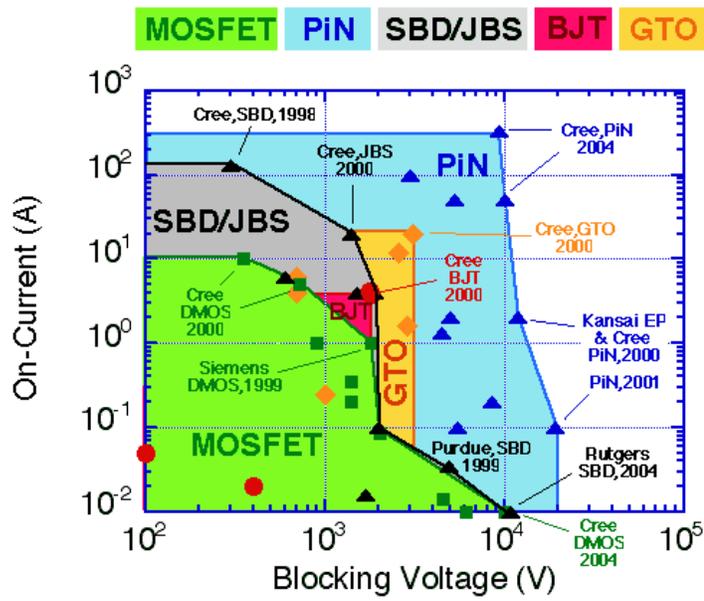
4.5 HACIA LOS CIRCUITOS INTEGRADOS DE POTENCIA

A la vez que el SiC alcanza su madurez, se puede esperar el aumento de la complejidad de los dispositivos SiC. El trabajo sobre los circuitos integrados SiC ya ha comenzado. Sin duda la confianza creciente en los dispositivos SiC va permitirle alcanzar su real potencial en los dominios y en condiciones que ningún otro semiconductor podrá soportar.

Las condiciones hostiles del espacio son un ejemplo del rango de aplicaciones donde los dispositivos SiC se justifican. Irónicamente, este material que nos a llegado de las estrellas es el que nos va a permitir alcanzarlas. Cualquiera que sea la utilización futura del SiC, es bien claro que es “un material para el futuro”.



Figura 8. Estado del arte de los dispositivos de electrónica de potencia SiC



5. METODOLOGIA

La optimización del diodo de potencia es una etapa indispensable a ser dominada para la continuación de los trabajos con otros DEP.

5.1 EL PROGRAMA MEDICI™ Y LA SIMULACION ELECTRICA

5.1.1 Descripción general. Es posible predecir el comportamiento eléctrico de un dispositivo por medio de simulaciones. La credibilidad de los resultados reposa en gran parte sobre la validez de los modelos físicos utilizados para definir los parámetros eléctricos del SiC-4H como la magnitud de la banda prohibida, la movilidad, la ionización por impacto, etc.

MEDICI™ es un programa de simulación eléctrica bidimensional de dispositivos semiconductores funcionando sobre el sistema operacional UNIX. Este programa es desarrollado por la universidad de Stanford en los Estados Unidos y es comercializado por la sociedad Technologie Modeling Associates TMA. Este programa por elementos finitos calcula la distribución de potencial, las concentraciones de portadores además de las líneas de corriente, de campo eléctrico en una estructura previamente definida en una etapa anterior que se puede denominar mallado con el fin de deducir las características eléctricas.

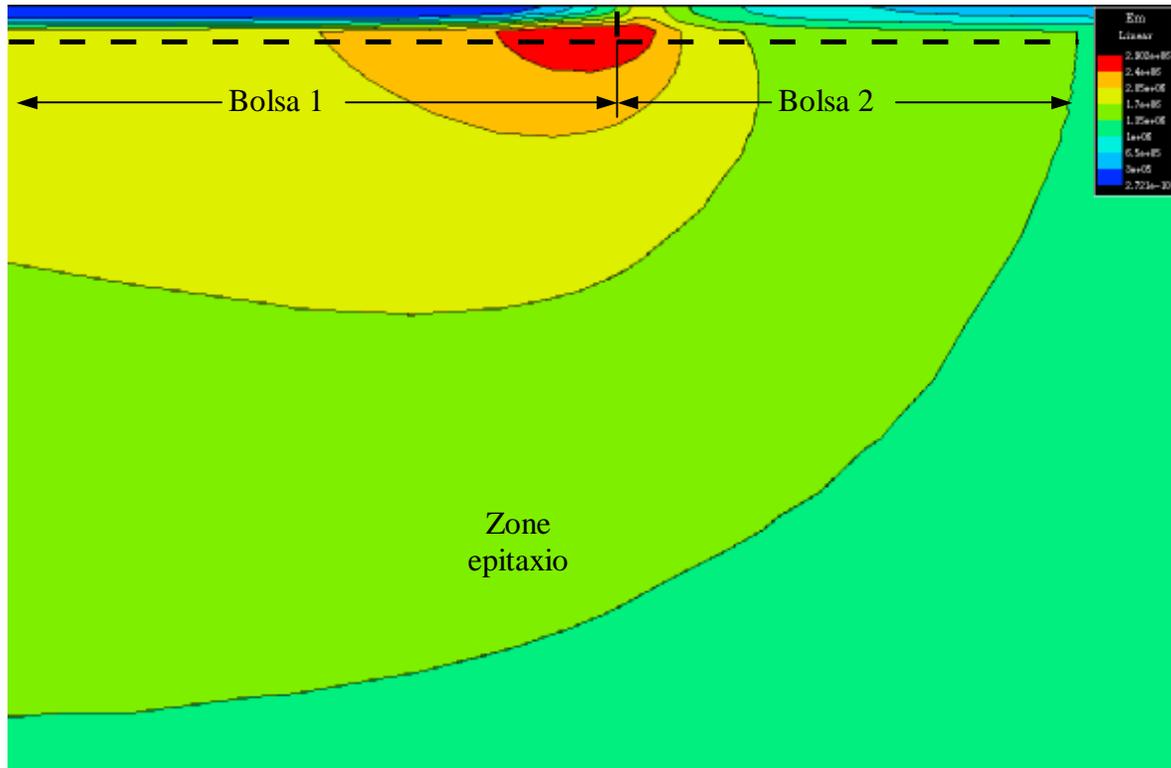
Las ecuaciones describiendo la física del dispositivo son discretizadas por medio de un mallado triangular de la estructura donde le corresponde al usuario especificar, siguiendo reglas geométricas establecidas. Es decir, mallar la estructura correctamente en las regiones donde las variaciones de carga, de potencial, de campo y de corriente son importantes.

La primera etapa del trabajo consiste, primeramente, en definir en el archivo de entrada del programa de simulación, la descripción geométrica del dispositivo además de la ubicación de los electrodos. En este estudio, los contactos han sido considerados como perfectos, sus resistencias son supuestas nulas. Se considera además una tasa de activación eléctrica de las impurezas dopantes del 100%. El perfil de dopaje puede ser definido siguiendo diferentes funciones analíticas. El perfil de dopaje adoptado para las uniones será muy abrupto. La descripción de un dopaje abrupto en el simulador induce dificultades de convergencia en los cálculos.

Por lo tanto se ha usado un modelo matemático que describe el dopaje siguiendo una ley Gaussiana fijando los parámetros del modelo de forma tal que el dopaje sea lo mas abrupto posible y de manera que se permita la convergencia en los cálculos. La disminución del nivel de dopaje, sobre una extensión de $0,1 \mu\text{m}$, a partir del valor máximo, ha mostrado ser un buen compromiso.

Esta primera etapa finaliza con la elaboración del mallado que consiste en discretizar el conjunto de capas del dispositivo. Esta parte del estudio es la más larga y la más delicada puesto que ella condiciona la convergencia de los cálculos, de los métodos iterativos y de la precisión de los resultados. Es importante observar lo que sucede en las uniones y entre las interfaces de concentración. Los puntos de mallado serán más numerosos en las zonas donde el dopaje varía bruscamente como las uniones.

Figura 9. Líneas de campo eléctrico máximo en el momento de ruptura alrededor de la interfaz entre la primera y la segunda bolsa. Simulación MEDICI™. Visualización TV2D



Igualmente, las regiones donde las magnitudes físicas evolucionan de manera remarcable deben, de la misma manera, ser malladas convenientemente, sobretodo en las regiones donde las variaciones son notables dentro de la zona de carga de espacio. Los resultados serán más precisos si la distancia entre los nodos del mallado se hace la más pequeña posible. Pero la distancia entre dos nodos no descenderá de la distancia interatómica de 0,1 nm porque ella no tiene sentido físico y hay riesgos de inducir divergencia en los cálculos. El mallado será mas fino principalmente en las junctiones y en las vecindades de los electrodos, es decir, en las regiones donde las variaciones de dopaje son importantes. Por



defecto, el espaciamiento de la malla deberá seguir una progresión geométrica para no inducir problemas de convergencia en la simulación.

El mallado es estimado correcto cuando disminuciones sucesivas de la malla no ocasionan variaciones significativas sobre los resultados eléctricos. Una vez que el mallado es generado, la simulación eléctrica puede ser lanzada, habiendo anteriormente creado un archivo de comandos donde serán mencionados los métodos de calculo, los modelos físicos, las condiciones iniciales, los pasos de iteración, el registro de las magnitudes físicas y de la señal eléctrica aplicada.

Durante la simulación, el tiempo de calculo es también uno de los parámetros a tener en cuenta: Un compromiso debe ser encontrado entre la precisión de los resultados y el tiempo de calculo puesto que el aumenta considerablemente con el numero de nodos del mallado.

5.1.2 Presentación de los diferentes modelos y parámetros utilizados por MEDICI™. En este numeral se propone exponer los principales modelos físicos utilizados y sus parámetros extraídos de la literatura para el SiC-4H. Con la ayuda del programa MEDICI™ para analizar el comportamiento de los dispositivos y predecir las características eléctricas, las ecuaciones de la física de los semiconductores son resueltas; ecuaciones de continuidad y de Poisson en cada nodo del mallado. Las ecuaciones a derivadas parciales son resueltas de manera iterativa. La solución final es alcanzada por un corte del paso de polarización en una sucesión de soluciones intermediarias. Estas son necesarias para obtener la convergencia. El programa MEDICI™ se encarga de reproducir los fenómenos físicos que suceden dentro de la estructura cuando ella es polarizada. Para ello es indispensable definir los modelos que traducen la realidad de los fenómenos.



- **Movilidad de portadores.** Ella es función de la concentración total de dopantes ionizados y de la temperatura. Otro modelo es utilizado a fuerte campo eléctrico tomando en cuenta la velocidad de saturación de los portadores y de la componente paralela del campo.

La generación/recombinación de tipo Shockley-Read-Hall son generalmente simuladas a través de un nivel situado en medio de la banda prohibida. Este modelo supone que existe una dependencia de la duración de vida de los portadores en función de la concentración total de las impurezas. Una estimación de los mecanismos de recombinación Auger ha sido estudiada cuando se está en presencia de fuertes concentraciones.

- **Duración de vida de los portadores.** El tiempo de vida de los huecos y los electrones puede ser dependiente de la concentración de dopantes o ella puede ser constante.

- **El tiempo de vida.** Se han hecho medidas tanto por la estimación del tiempo de vida ambipolar extraído de las formas de onda de la corriente de superposición de un diodo bloqueado como por medidas de generación óptica de portadores. El tiempo de vida de los minoritarios es de alrededor $5 \mu\text{s}$ en un epitaxio de tipo N (nitrógeno, 10^{15} cm^{-3}) en un SiC-4H de débil inyección. El tiempo de vida de los electrones dentro del SiC de tipo P es poco estudiada y las principales medidas de la literatura, concierne a los huecos.

La velocidad de saturación de los portadores es obtenida cuando el campo eléctrico alcanza valores elevados, valor que depende de las simulaciones. Si no es el caso, la velocidad de transporte de los portadores es proporcional al campo eléctrico de conducción $v = \mu E$.



De esta forma, el simulador MEDICI™ ha sido presentado y ahora se procede a la descripción del diodo a simular.

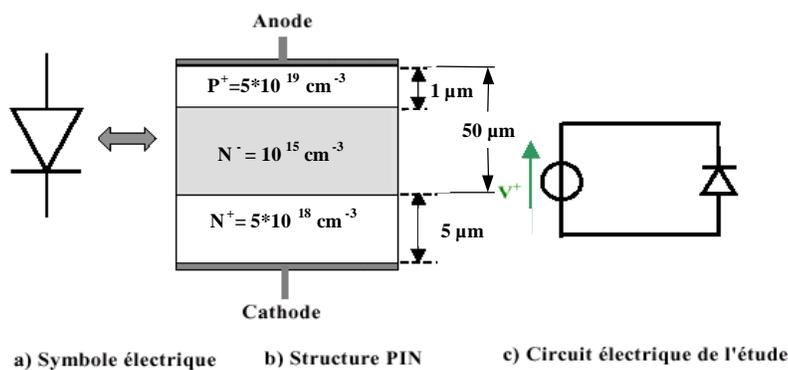
5.2 PRESENTACION DE LA JTE PARA UN DIODO 7500 V-1D

Para optimizar un diodo que posee una tensión de ruptura de 7500 V, Se han extraído de la bibliografía algunas características para las capas como los espesores y los dopajes [4].

5.2.1 El modelo de diodo 1D.

- **Presentación de la estructura simulada.** El modelo unidimensional o en volumen permite obtener la tensión de ruptura ideal. La figura 10b presenta la estructura simulada con los parámetros retenidos. El ejemplo presenta un diodo SiC-4H con un espesor de capa epitaxio de $50\ \mu\text{m}$ y un dopaje n de 10^{15}cm^{-3} que permite llegar a conservaciones de la tensión superiores a 7,5 kV. El esta constituido de una capa p de $1\ \mu\text{m}$ dopada a $5 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}$ y de un sustrato N⁺ dopado a $5 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$.

Figura 10. Esquema del símbolo eléctrico (a) de la estructura pin (b) y de su circuito eléctrico de prueba (c)

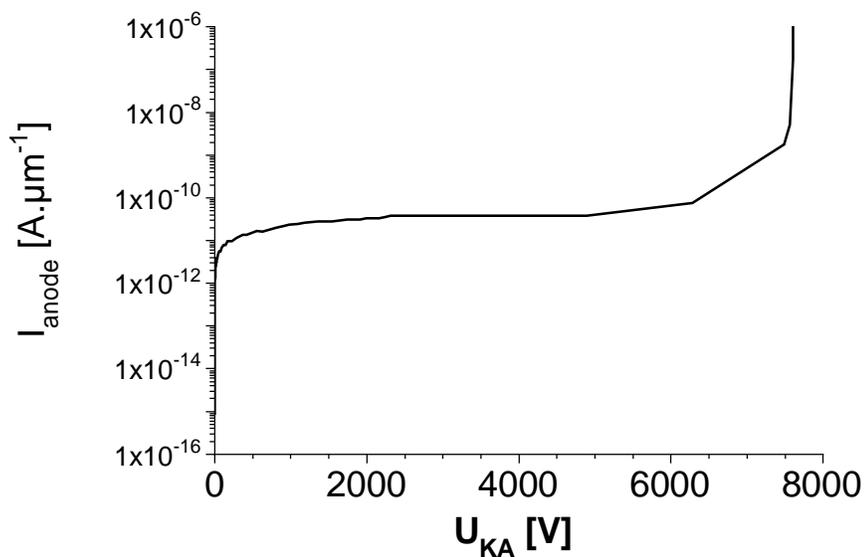


- **Régimen inverso.** La tensión de ruptura V_{BR} es la tensión que puede soportar un dispositivo en el estado boqueado. Cuando el diodo es sometido a una



polarización inversa, la corriente medida en sus bornes permanece débil y varía poco con la tensión. Cuando la tensión de polarización llega a ser próxima a la tensión de ruptura V_{BR} , se nota una variación considerable de la corriente que es debida al aumento del número de portadores en la unión. Entonces el dispositivo entra en ruptura. El aumento de la corriente atravesando el dispositivo puede ocasionar la destrucción total o parcial del dispositivo. La figura 11 representa una característica eléctrica en régimen inverso del diodo. La conservación en tensión es igual a 7500 V.

Figura 11. Característica tensión corriente del diodo PiN simulado en régimen inverso



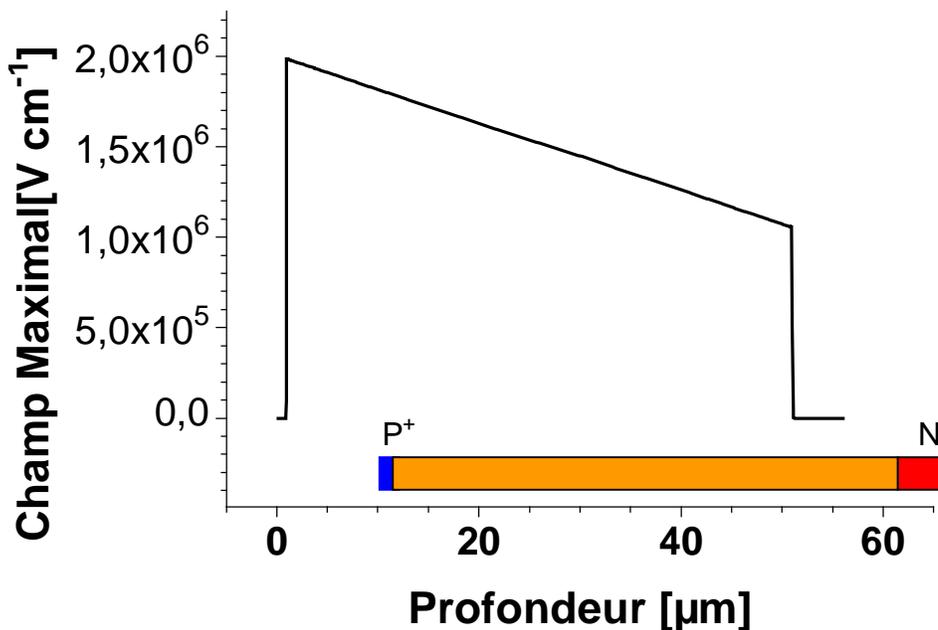
El aumento de la corriente es debido a la multiplicación por avalancha de los portadores que participan en la corriente. En polarización inversa, el campo eléctrico máximo que existe en la zona de transición puede, si la tensión es lo suficientemente elevada, comunicar una energía suficiente a los portadores que ionizarán los átomos de la red y crearán así un par electrón hoyo. Es el fenómeno de multiplicación por avalancha. Al fijar el espesor y el dopaje de la capa se condiciona una cierta conservación de la tensión. En polarización inversa, la



magnitud del campo eléctrico puede ser el factor que ocasione la limitación de la conservación de la tensión por la multiplicación de los portadores por ionización de los átomos de la red. Para evaluar el fenómeno de ruptura de los dispositivos en carburo de silicio es necesario conocer el campo crítico de ruptura y los coeficientes de ionización.

En polarización inversa, el perfil de campo eléctrico de una juncion P⁺N es de forma triangular [6]. La pendiente del campo es inversamente proporcional al dopaje. Para los casos de la juncion troncada de un diodo PiN, el perfil de campo llega a ser trapezoidal. La extensión de la zona de carga de espacio en la zona N⁺ es despreciable debido al dopaje elevado de esa zona. Para un espesor dado, La conservación de la tensión es mejorada cuando el perfil del campo es trapezoidal. La extensión del perfil de campo en función de la profundidad acabo en el valor de la conservación de la tensión por el cálculo del área bajo la curva.

Figura 12. Perfil del campo eléctrico para una juncion abrupta troncada



Se ve seguido aparecer en diferentes obras un campo eléctrico de ruptura E_m , por encima del cual la tensión, resultante de él, no puede crecer mas. Se le llama también campo máximo alcanzado cuando $V=V_{BR}$ que procura suficiente energía a los portadores para inducir la multiplicación por avalancha. Pero el campo máximo no produce en todos los casos la avalancha. Es la integral dependiendo del campo que la hace:

$$\int a(E)E(x)dx = 1$$

$\alpha(E)$ =coeficiente de ionizacion medio

Muchos estudios han sido desarrollados a fin de determinar experimentalmente los coeficientes de ionizacion del SiC. Estos coeficientes son parámetros importantes para evaluar la conservación en tensión de los dispositivos de potencia durante su concepción. Las diferencias constatadas entre los valores teóricos y prácticos de las tensiones de ruptura de los diferentes dispositivos son en parte debidos a la incertidumbre sobre los valores de los coeficientes de ionizacion utilizados. Esto es confirmado por la multitud de valores presentes en la literatura.

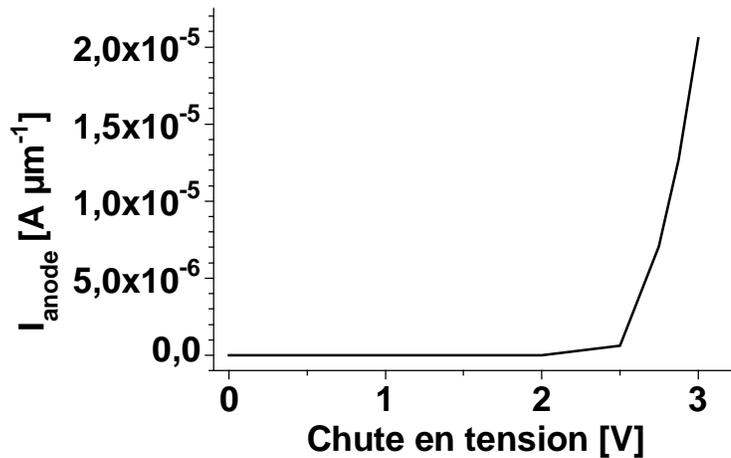
Señalemos en particular que los coeficientes de ionizacion por impacto retenidos son aquellos dados por M. Konstantinov et al. [4] y que el criterio retenido para determinar la tensión de ruptura es el de la integral de ionizacion cuando $i=1$ entonces $V= V_{BR}$ y no el criterio del campo critico dentro del carburo de silicio.

- **Régimen directo.** Se viene de presentar la optimización del diodo en régimen inverso pero no se puede olvidar el régimen inverso de éste.

A continuación se muestra el comportamiento del diodo en directa.

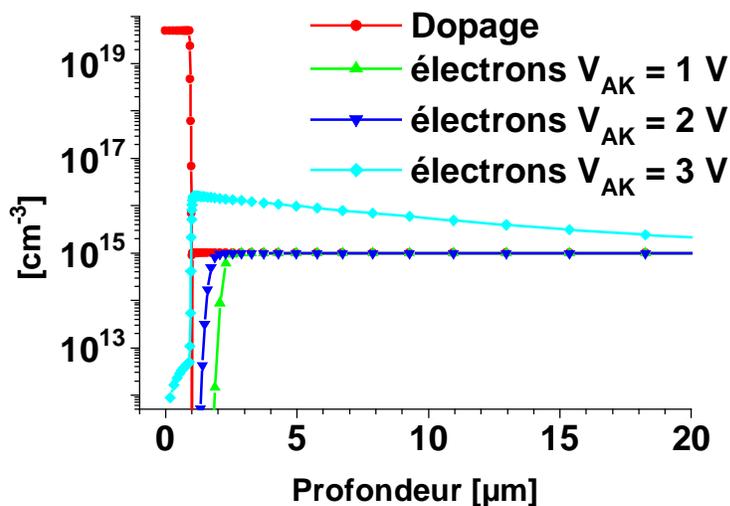


Figura 13. Característica I (V) del diodo 1D polarizado en directa



Cuando se procede a la polarización en directa, el material P⁺ inyecta hoyos al material N y la zona N⁺ inyecta electrones, es el fenómeno de conducción por difusión. Si la longitud de difusión es superior al espesor de la Zona N, entonces estamos en régimen de fuerte inyección por lo que la concentración de electrones es igual a la concentración de hoyos que es muy superior al dopaje.

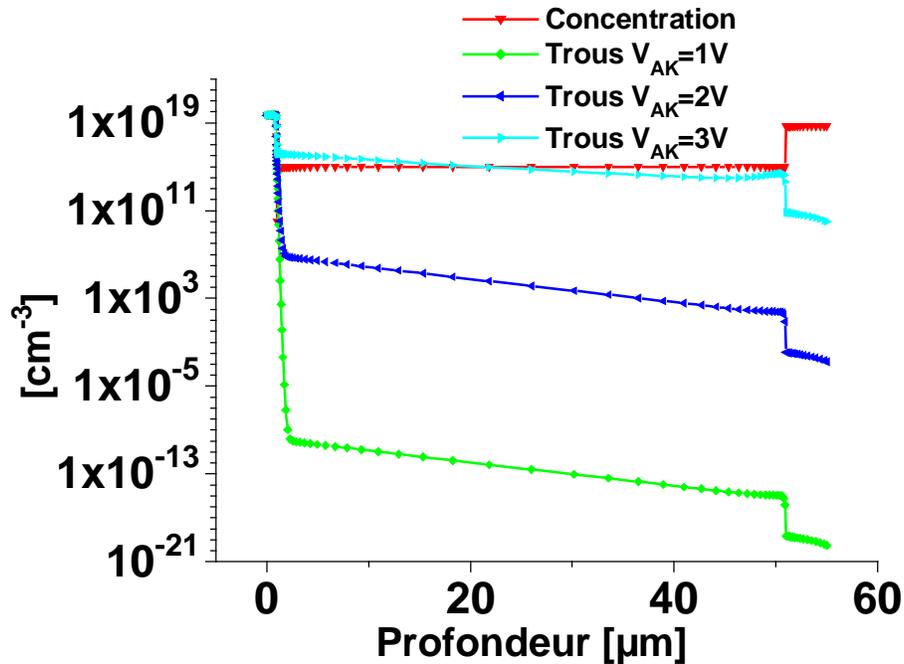
Figura 14. Corte vertical de la concentración de electrones para diferentes tensiones V_{AK} a 1, 2 y 3 V



V.



Figura 15. Corte vertical de la concentración de hoyos para diferentes tensiones V_{AK} a 1, 2 y 3



V.

La densidad de corriente es definida por la relación siguiente donde el término de corriente por campo es despreciable frente al término de corriente por difusión.

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} - qD_n \nabla n$$

donde el coeficiente D_n representa la difusión de los portadores. El es determinado por la relación de Einstein definida en seguida:

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q}$$

donde μ_n representa la movilidad de los electrones, k la constante de Boltzman, T la temperatura absoluta y q la carga elemental ($kT/q=25\text{mV}$ para $T=300^\circ \text{ K}$).

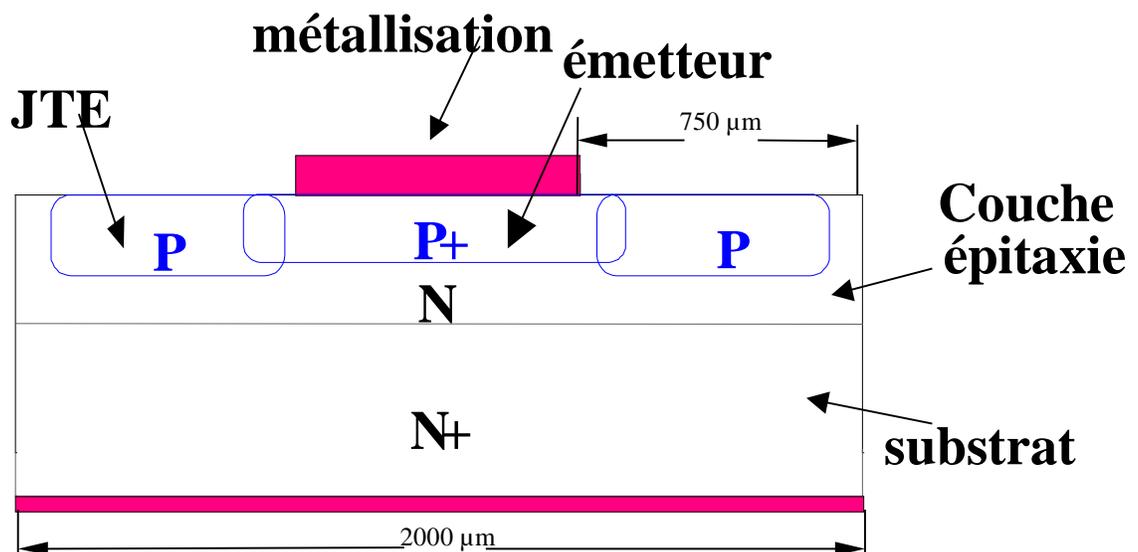


De esta manera terminamos el estudio del diodo unidimensional y damos paso al problema bidimensional.

5.2.2 El diodo 2D. Encontrar el perfil de concentración horizontal para el mejor resultado de conservación de la tensión de un diodo SiC-4H es el objetivo de esta práctica de fin de estudios.

Se esta buscando una solución para los altos valores de campo eléctrico en las curvas de la unión principal. De hecho, la ruptura para una unión no protegida tiene lugar en estos sitios.

Figura 16. Sección transversal de la estructura del diodo bipolar cilíndrico protegido por JTE



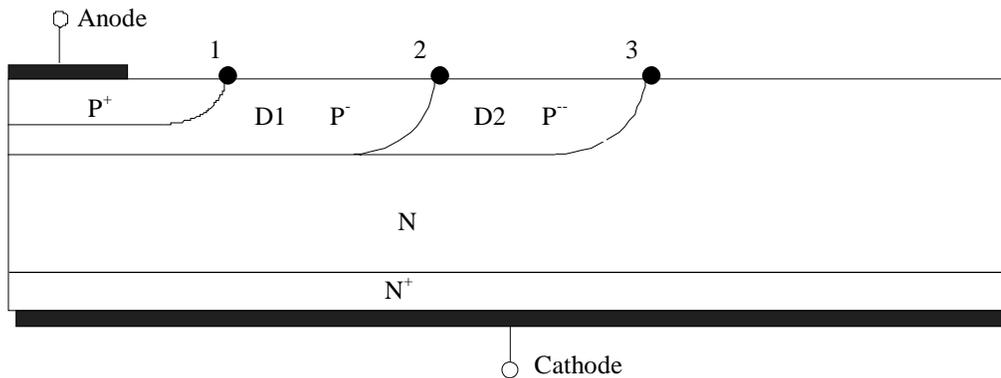
Existe en la literatura algunas estructuras de terminación realizadas por multi - implantación lateral que es la situación que nosotros prevemos [13,15].

La estructura de terminación propuesta por V.A.K. TEMPLE y W. TANTRAPORN en [13] (cf fig 16) es realizada por una doble implantación. Ella consiste en



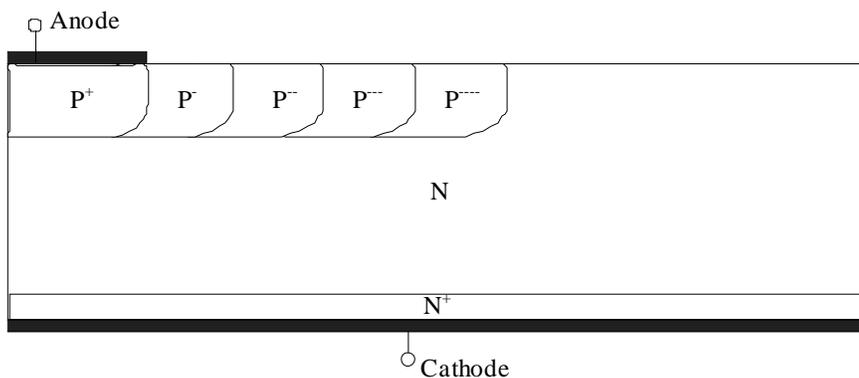
efectuar una implantación para la dosis D_1 alrededor de la unión principal P^+ y prolongarla por una segunda D_2 a dosis más débil. Los valores máximos de campo eléctrico en la superficie sobre los puntos 1, 2, 3 dependen de los valores de las dosis D_1 y D_2 .

Figura 17. Estructura doble implantación propuesta por V.A.K. TEMPLE y W. TANTRAPORN



Es posible pensar en aumentar el número de implantaciones, el número de picos de campo eléctrico aumenta en consecuencia y sus repeticiones van a conducir a una uniformización del campo en la estructura presentada por HAMZA YILMAZ [15] en la figura 17.

Figura 18. Estructura periférica multi regiones mono unión propuesta por HAMZA YILMAZ

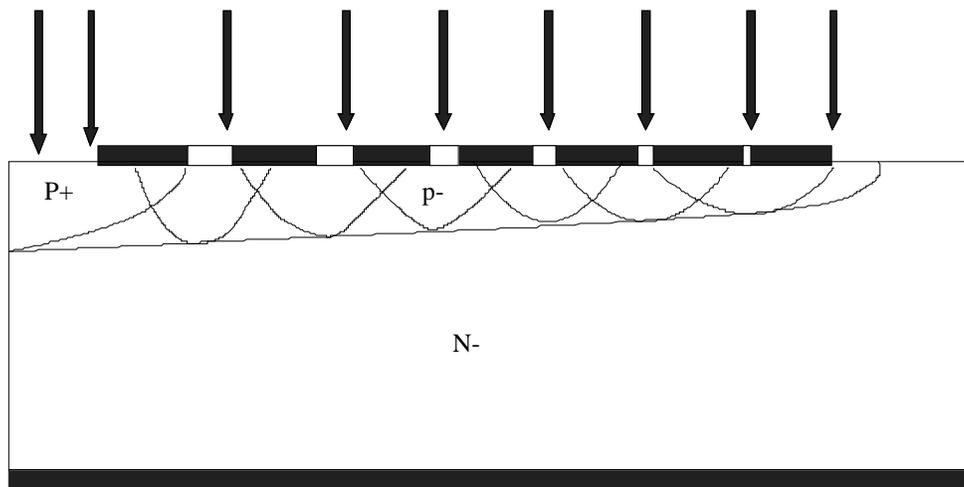


Al realizar una estructura con diferentes bolsas donde sus dosis implantadas y sus profundidades de juncion disminuyen alejándose de la juncion principal, ellos permiten uniformizar el campo eléctrico y por ello la ausencia de picos de campo.

Esta técnica de variación de dopaje ha sido propuesta por R.STENGL, U. GOSELE et al. [14] para un diodo en silicio. Ella suaviza la curva de la juncion principal y la hace desaparecer gradualmente. Esto es favorable para obtener tensiones de ruptura próximas a la tensión de ruptura para una juncion plana. Ella consiste en realizar una única implantación a través de una mascara provista de huecos de diferente grosor.

La dosis implantada, función del grosor de cada hueco, seguido de una difusión de redistribución, conduce a una repartición ilustrada en la figura 18.

Figura 19 Repartición espacial de bolsa obtenida por la técnica de variación lateral de dopaje (VLD) propuesta por R. STENGL, U. GOSELE et al [14]



Entre estas estructuras, se ha escogido una de tipo bolsa homogénea de una a tres zonas de dopaje y otra a variación lateral de dopaje.



Existen tres parámetros a optimizar para concebir una JTE óptima: Profundidad, dopaje y longitud de la bolsa.

Como la estructura es realizada por epitaxio y en el carburo de silicio las impurezas casi no se difunden la profundidad de la juncion de la bolsa será pequeña: 1 μm .

A fin de estudiar la influencia de la dosis sobre la conservación de la tensión, perfiles de dopaje de bolsa teniendo dosis totales comprendidas entre $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ han sido simuladas. La dosis es evaluada al integrar el perfil de dopaje de la bolsa sobre toda su profundidad. Ella es fijada a 1 μm . La implantaciones no tienen sentido si se trabaja por debajo de $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ puesto que la dosis del epitaxio es igual a $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ es una dosis muy elevada para la JTE puesto que ella viene a ser del mismo orden de magnitudes que el emisor.

Trabajos de investigacion [3,10] muestran que la JTE funciona bien a partir de una longitud de 100 μm . Desde el punto de vista de la conservacion de la tension del semiconductor solo, es inutil aumentar mas la longitud de las bolsas. De un punto de vista practico, en ausencia de capa dielectrica en la superficie de los dispositivos, ha sido escogido adoptar una bolsa de 250 μm a fin de intentar minimizar los problemas de ruptura en el medio ambiente.(aire). Pero el ambiente por encima de las periferias es a tener en cuenta. Para la tension de ruptura, el anodo se encuentra en la masa y las altas tensiones se encuentran al final de la bolsa. Fuertes tensiones son sobre pequeñas distancias (250 μm) lo que implica campos eléctricos elevados en el aire por lo tanto una posibilidad de ruptura en él. Este estudio mas preciso sobre la importancia del material dieléctrico sobre la bolsa seria el objeto de la ultima parte del capitulo 3.



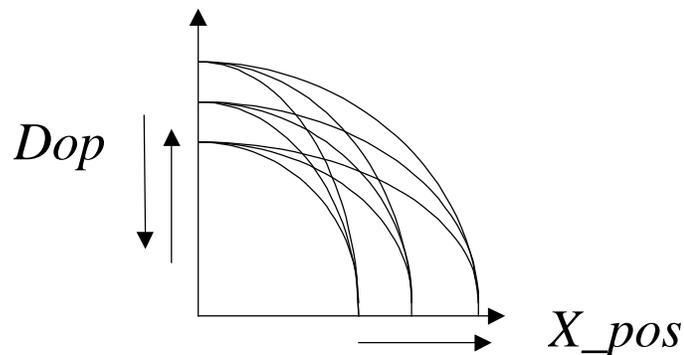
6. PRESENTACION DE LOS RESULTADOS DE SIMULACION

Este capítulo reagrupa los resultados de simulación del diodo. Primeramente se van a presentar los resultados del diodo protegido por una sola bolsa donde su perfil presenta la particularidad de variar transversalmente. La segunda parte retoma este perfil monobolsa utilizando un perfil constante según toda la dirección horizontal. La tercera parte ilustra los resultados del diodo protegido por tres bolsas. Finalmente, una discusión, una conclusión y las perspectivas de “este estudio son presentadas.

6.1 EL PERFIL DE DOPAJE VARIABLE

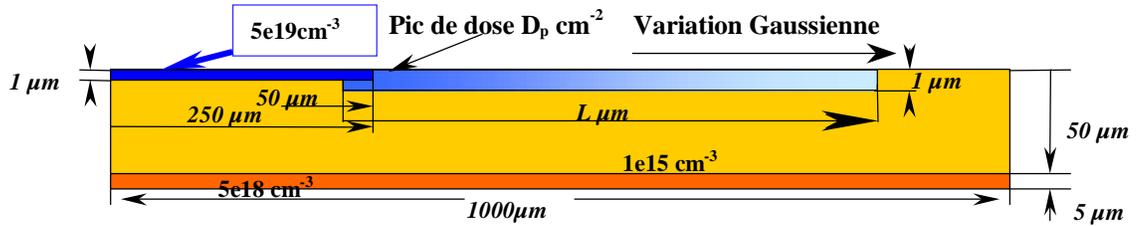
Primeramente, el diodo con un perfil de JTE variando longitudinalmente según una distribución Gaussiana ha sido simulado. Los parámetros de la simulación son la concentración máxima y la longitud de la bolsa. La figura ilustra 9 (3x3) ejemplos de perfil de bolsa.

Figura – ilustración. 9 ejemplos de perfil de bolsa



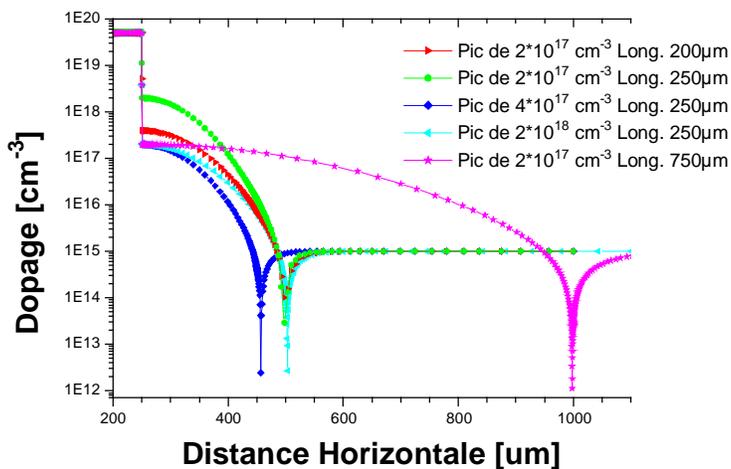
La concentración de la extensión del emisor viene siendo más débil a medida que se avanza en *X*. Para este caso, el perfil en función de la profundidad será constante. La curva Gaussiana ha sido utilizada en MEDICI™ a fin de simular una variación longitudinal de la dosis con un pico al inicio de la bolsa que inicia a 200 μm de la estructura a ser simulada.

Figura 20. Vista en corte del diodo protegido por una bolsa donde el perfil lateral es Gaussiano



La figura 20 muestra las diferentes zonas de la estructura haciendo aparecer sus dimensiones geométricas. Los contactos de ánodo y de cátodo miden 250 μm y 1000 μm respectivamente. La longitud total de la semi-celda es de 1000 μm . La profundidad para la tercera dimensión es de 1 μm . Este es un valor por defecto impuesto por el simulador. El perfil vertical de la bolsa ha sido definido por un vector de datos. Este archivo ha sido determinado por un simulador llamado I₂SiC que modeliza la implantación iónica en el SiC.

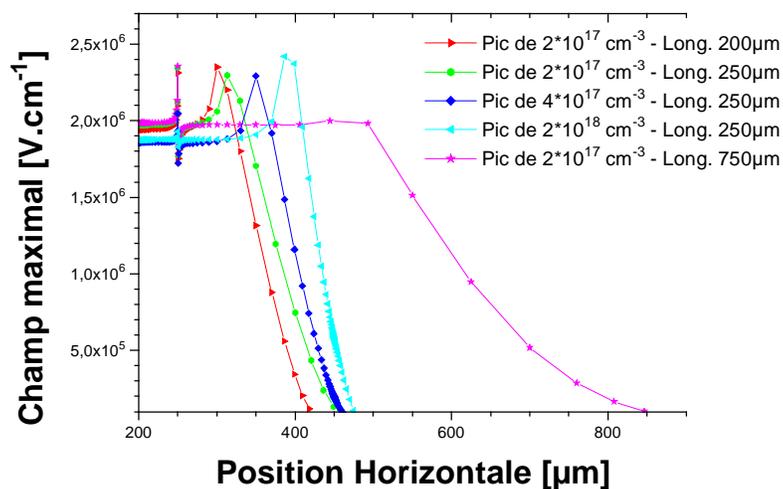
Figura 21. Perfiles de concentración laterales para la bolsa. Corte transversal a 0,5 μm



La figura 21 muestra magnitudes típicas de la dosis de implantación iónica muy pobres, muy fuertes e intermedias además de posibles longitudes de una JTE para el diodo objeto de éste estudio.

El análisis del perfil lateral del campo eléctrico nos permite notar si la bolsa, en función de su pico de concentración, es óptima.

Figura 22. Campo máximo dentro de la unión. Profundidad: 1 μm

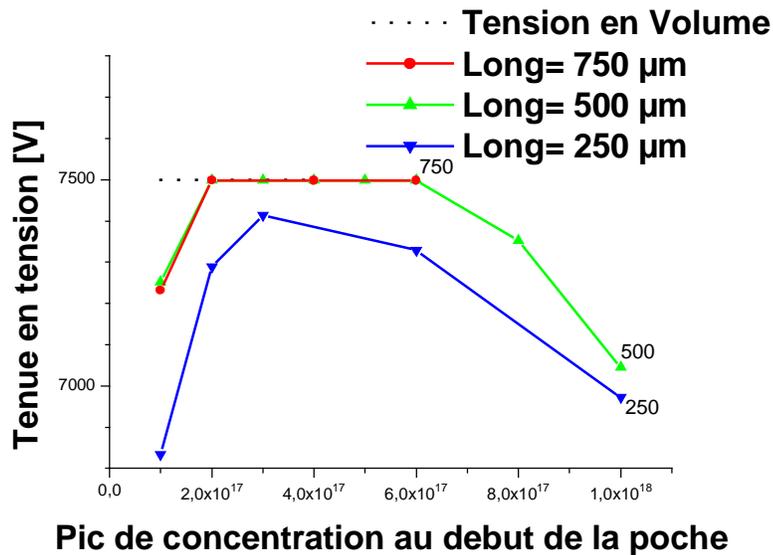


La ruptura tiene siempre lugar en la posición horizontal donde la concentración es igual a 10^{17} cm^3 para una longitud de bolsa de 200 y 250 μm . En cambio para una bolsa de 750 μm de longitud, el pico de campo está presente solamente al inicio del emisor como para los otros casos. Las líneas equipotenciales son dilatadas lo mejor posible. Es por esto que una longitud de bolsa de 750 μm sería óptima para un perfil de concentración lateral de tipo Gausiano.

Un perfil variable de JTE óptima implica un campo constante a lo largo de toda la unión en el momento de la ruptura. Eso es lo que se desea.



Figura 23. Conservación de la tensión en función del pico de concentración



Simulaciones con el fin de observar la conservación de la tensión han sido realizadas para diferentes picos de concentración y longitudes de bolsa. Los resultados son ilustrados en la figura 23. Ellas muestran que la conservación de la tensión no esta tan ligada al pico de dopaje para longitudes de bolsa superiores a 500 μm. La dependencia de la conservación de la tensión en función de estos parámetros, muestra que las mejoras aportadas por el alargamiento de la protección periférica se dejan de notar fuertemente por encima de 500 μm, pero una vez mas, desde el punto de vista de la conservación en tensión del semiconductor solo, es inútil aumentar mas el área consagrada a la bolsa. Desde el punto de vista practico, en ausencia de capa dieléctrica en la superficie de los dispositivos, una bolsa de longitud efectiva de 750 μm seria escogida a fin de minimizar los problemas de ruptura en el aire.

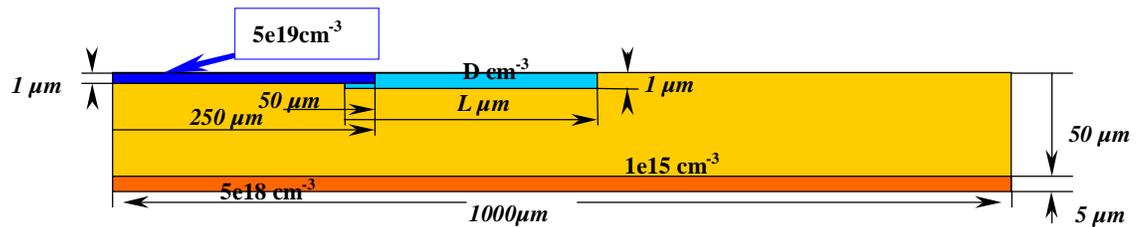
Este perfil de implantación no es realizable en tecnología. Es por ello que se quiere mostrar la influencia del número de bolsas sobre la conservación en tensión del dispositivo. La continuación de este informe, va a mostrar los resultados utilizando un perfil lateral constante.



6.2 LA MONOBOLSA

Simulaciones para diferentes dosis de implantación iónica y longitudes de bolsa han sido realizadas. La figura 24 representa la estructura simulada y sus parámetros.

Figura24. Definición de la estructura 2D simulada del diodo protegido por bolsa



En la continuación de este informe no se va a continuar usando la concentración sino la dosis como parámetro de implantación. Ella será normalizada a 10^{13} cm^{-2} . La figura 25 representa el perfil lateral de la concentración de la bolsa para diferentes dosis y longitudes.



Figura 25. Concentración de la bolsa. Corte a 0.5 μm de profundidad

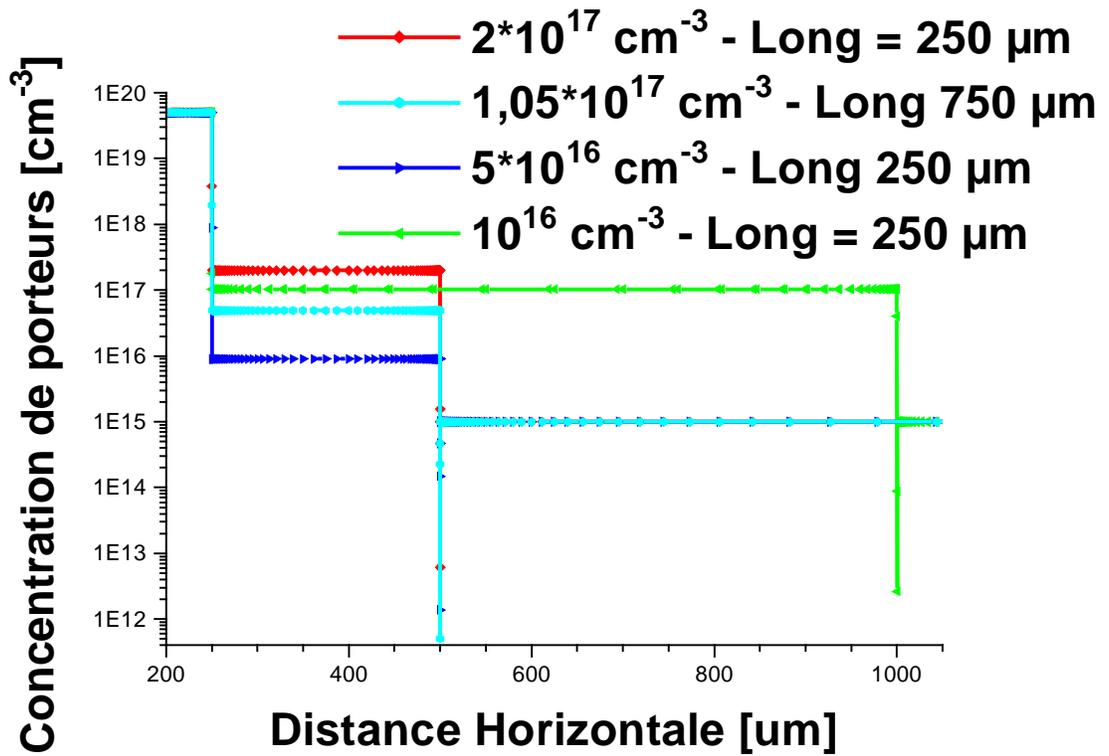
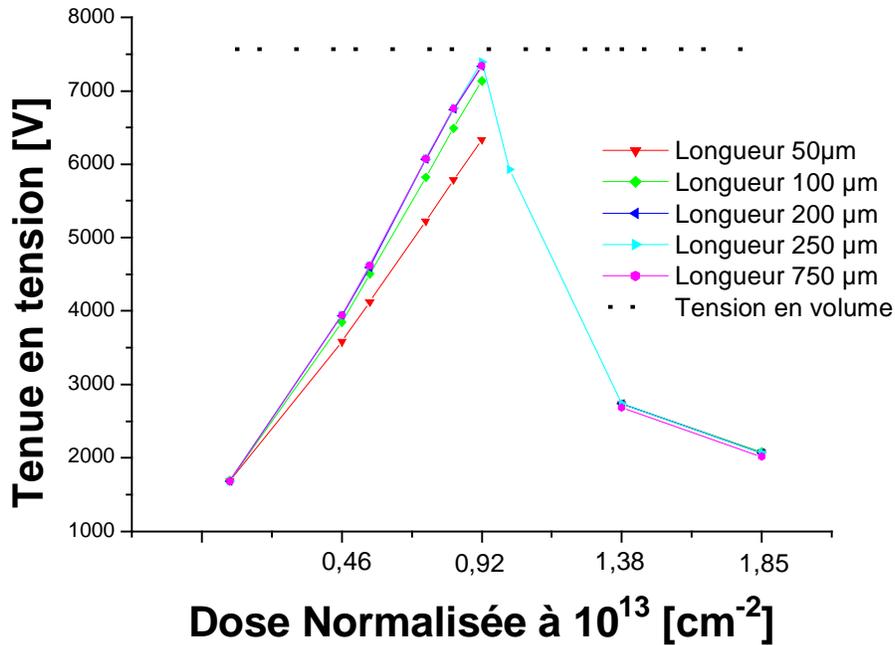


Figura 26. Conservación de la tensión en función de la dosis de la bolsa



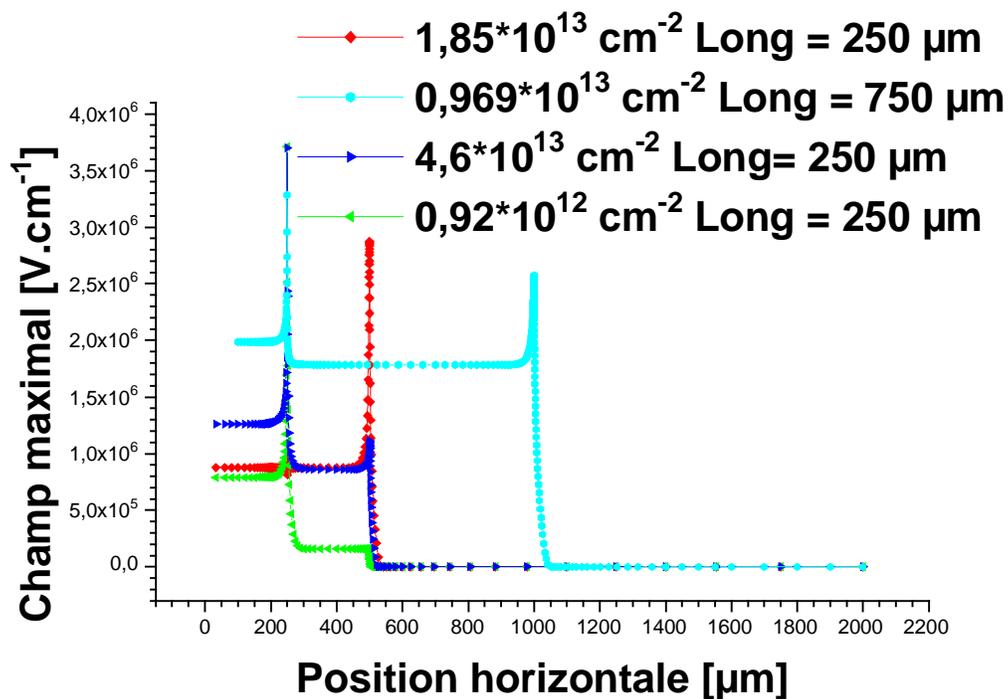
La figura 26 representa la conservación de la tensión en función del dopaje para diferentes longitudes de bolsa. La JTE conserva muy bien la tensión a partir de una longitud de 100 µm. Para las dosis de aceptadores mas pobres en la JTE, se ve en aumento lineal de la tensión de ruptura; del otro lado se observa una caída mas rápida después de haber pasado por un máximo. En este caso, la dosis situada justo antes del valor máximo de la tensión de ruptura esta en la vecindad de 10^{13} cm^{-2} . Estos resultados muestran que la dosis optima de la extensión lateral de la juncion se encuentra cerca de 10^{13} cm^{-2} para la estructura que se esta estudiando, debiendo conducir a una eficacia de protección del orden de 99%. Los resultados muestran conservaciones de tensión de hasta 99% del valor ideal. Se observa que la tensión de ruptura es muy sensible a la dosis de implantación de la bolsa y poco sensible a la variación de la longitud de la bolsa.

La figura 27 ilustra el perfil lateral del campo eléctrico. Una monobolsa óptima mostraría un pico de campo idéntico al principio y al final de la bolsa en el



momento de la ruptura. Según la figura 27, 10^{12} cm^{-2} es una bolsa muy pobre para la conservación en tensión que se espera. Es estos casos, la ruptura esta al principio de la bolsa. Para una dosis de $1,85 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, el pico de campo se encuentra al final de la bolsa. En este ultimo caso, la bolsa juega el mismo papel que el emisor lo cual no es de interés en una aplicación.

Figura 27. Perfil lateral de la magnitud del campo eléctrico para diferentes dosis y longitudes de bolsa



En conclusión, la bolsa debe tener una longitud superior a 250 μm y una dosis de $9,69 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (0,969 en por unidad). La figura 26 muestra que la conservación de la tensión es muy sensible a la dosis de la bolsa. La siguiente parte es una combinación de las ventajas de la primera parte teniendo en cuenta las posibilidades tecnológicas ilustradas en esta segunda parte.

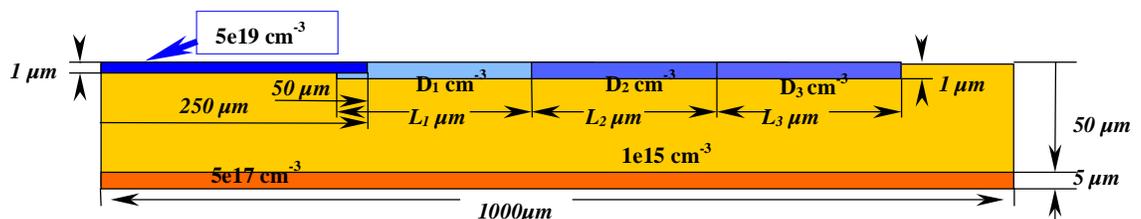


6.3 LAS TRES BOLSAS

No es mas fácil producir DEP a tres bolsas que a una pero esta protección permitiría disminuir los picos de campo máximo dentro del DEP mas específicamente alrededor de la juncion en el momento de ruptura. Se ha escogido una dosis central de $0.97 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ porque se ha mostrado que en todas las JTE de la primera parte, el pico de campo eléctrico se encuentra en las vecindades de esta concentración. Hay un problema cuando se implanta la dosis. La bolsa se implanta con un error lo que a veces la hace muy fuerte en dosis y esto implica una disminución de la conservación de la tensión.

Simulaciones preliminares han sido realizadas a dos y tres JTE en donde se alcanzan conservaciones de la tensión del 99% del valor ideal. También se hicieron variaciones a las longitudes de las bolsas. Enseguida, intervalos de dosis de implantación iónica han sido definidos para las tres JTE y han mostrado la misma conservación de la tensión de 99% del valor ideal.

Figura 28. La figura presenta la estructura bi-dimensional estudiada y los parámetros geométricos y tecnológicos necesarios en su descripción bajo MEDICI



Ahora, se van a definir mediante simulación, Los intervalos de dosis para longitudes de bolsa fijas iguales a $250 \mu\text{m}$ cada una. La figura 28 ilustra la estructura simulada. Las longitudes de bolsa son iguales a $250 \mu\text{m}$ cada una.



Se han definido, de una simulación a otra, incrementos de dosis de $4,6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Se ha aumentado la primera bolsa hasta una dosis de $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ porque, a dosis mas elevadas se tendría una bolsa muy fuerte que juraría el rol de emisor. Se ha disminuido la tercera bolsa hasta $0,5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ puesto que, por debajo, el tipo de material no se molificaría. A partir de estos límites para la primera y la tercera bolsa, se definieron mediante simulaciones los otros límites además del intervalo de dosis de la bolsa central. Finalmente los casos más extremos fueron simulados.

La figura 29 muestra un perfil de concentración lateral típico a tres bolsas con un cambio abrupto al final de la ultima bolsa, con superposiciones o recubrimientos entre las diferentes bolsas, en este caso, las tres bolsas tienen una misma dosis implantada. Las monturas presentando zonas de dopaje superiores hacen alusión al recubrimiento debido a la superposición de dos implantaciones vecinas.

Figura 29. Perfil de dopaje de una protección periférica a tres bolsas para la misma dosis en cada bolsa

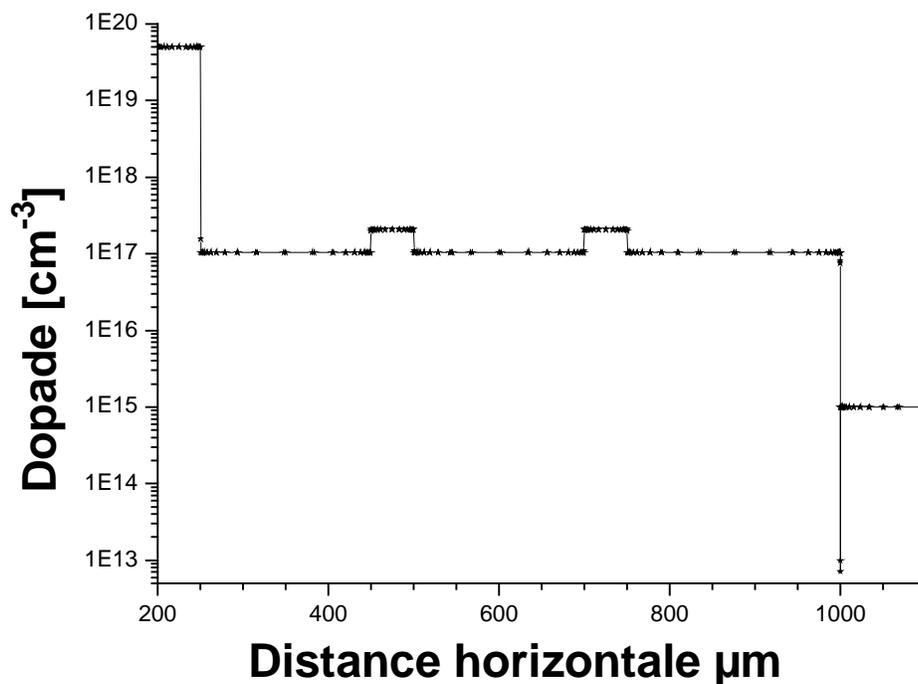
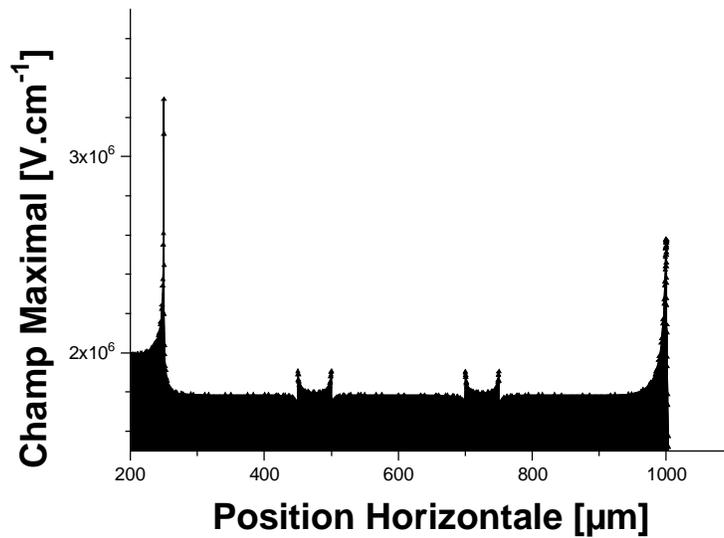


Figura 30. Campo máximo en la unión. Profundidad: 1µm. Los picos de campo máximo se localizan en los cambios abruptos de dopaje



Muchas simulaciones han sido lanzadas a fin de determinar la conservación en tensión del diodo. A partir de estos resultados, Las variaciones de la dosis de la JTE han sido definidas. Los valores de conservación en tensión y de intervalos de dosis han permitido definir ábacos de conservación en tensión en función de la dosis de cada bolsa. Las dosis de bolsa son normalizadas a 10^{13} cm^{-2} .



Tabla 3. Influencia de la dosis sobre la conservación en tensión. Comparación para dos posibilidades a una bolsa y a tres bolsas. Dosis normalizada a 10^{13} cm^{-2}

Conservación de la tensión	>99%			90%			80%			
	Bolsa	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Tres bolsas de 250 μm de longitud C/U		1,3 \pm 23%	1,03 \pm 15%	0,92 \pm 4,9%	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		1,3 \pm 23%	0,96 \pm 9,4%	0,89 \pm 7,7%	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		1,3 \pm 23%	0,94 \pm 7%	0,87 \pm 10%	-----	-----	-----	1,5 \pm 35%	1,4 \pm 41%	0,83 \pm 16%
		1,3 \pm 23%	0,92 \pm 4,9%	0,83 \pm 16%	1,5 \pm 35%	0,95 \pm 45 \pm 1%	0,87 \pm 11%	1,5 \pm 35%	1,1 \pm 24%	0,8 \pm 20%
		1,3 \pm 23%	0,9 \pm 2,5%	0,8 \pm 20%	1,5 \pm 35%	0,93 \pm 8,6%	0,85 \pm 13,5%	1,5 \pm 35%	0,88 \pm 4,3%	0,73 \pm 31%
Monobolsa desde 200 μm hasta 750 μm de longitud		0,969 \pm 0%			0,9 \pm 7,7%			0,854 \pm 13,5%		

Según el porcentaje de conservación en tensión deseada; 80%, 90% o 99%, la dosis media para cada bolsa no son las mismas para los tres casos. Además, los intervalos de dosis son mas grandes a medida que el porcentaje de conservación en tensión disminuye. 90 simulaciones han sido necesarias para realizar este ábaco.

Se observa una dependencia de la dosis D2 hacia la dosis D3 para una misma conservación de la tensión. D2 y D3 son llamadas dosis complementarias. Así, si



D2 es disminuida, D3 será aumentada y viceversa. Este principio es aplicable también si se aumenta alguna de las dos dosis. Para estas variaciones, D1 guarda el mismo intervalo de variación. Para determinar una línea del ábaco, nueve simulaciones, en general, fueron necesarias.

Para definir los parámetros de una siguiente simulación, se ha debido observar la localización del pico de campo crítico con el fin de decidir cual sería la bolsa a disminuir o aumentar en dosis.

La conservación en tensión disminuye bruscamente al 50% si la dosis D3 es superior a $0,969 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Esta variación se aplica para la última bolsa sin importar el número de bolsas de la protección.

Los diseños de la protección periférica de diodos bipolares a tres JTE han sido concebidos, simulando su comportamiento eléctrico con el simulador comercial MEDICI™ Avant !. La longitud de las extensiones y la concentración del dopaje P de las JTE han sido optimizados a fin de obtener una tensión de ruptura máxima.



7. CONCLUSIONES

Las simulaciones de la conservación de la tensión han sido lanzadas teniendo en cuenta una capa de aire de un espesor de 50 μm en la superficie del semiconductor fijando una densidad de carga nula en la interfase aire/SiC. El aislamiento del dispositivo presenta aun problemas ligados a la interfase SiC/aislante sobretodo el deposito de los óxidos no esta aun optimizado. Según las simulaciones eléctricas, el SiO_2 soporta los máximos campos eléctricos. Un trabajo complementario debe ser hecho a fin de tener en cuenta la ionización del aire. Un criterio en las simulaciones debe ser encontrado a fin de considerar este fenómeno. También, el interés de un aislante será demostrado en simulaciones.

La capacidad de los equipos de cálculo que han sido puestos a disposición permiten obtener resultados con tiempos de calculo particulares. En efecto, una estructura definida bajo dos dimensiones comprendiendo un numero de 8000 nodos necesita una memoria considerable y un tiempo de calculo de 7 horas. Los trabajos han sido efectuados sobre el sistema UNIX montado sobre estaciones de trabajo SUN ultra 5.

Esta práctica ha permitido la realización de un ábaco permitiendo la optimización de un diodo protegido en periferia con tres bolsas. Este ábaco permite diferentes intervalos de dosis aceptables para obtener una conservación de la tensión óptima y ha permitido mostrar en simulación las limitaciones del aire como aislador.

BIBLIOGRAFIA

F. Nallet, Conception, réalisation et caractérisation d'un composant limiteur de courant en carbure de silicium, thèse INSA de Lyon - CEGELY, 2001, 194 p.

N.Arssi, Conception d'un thyristor 5 kV en carbure de silicium pour assurer la génération d'impulsions de forte énergie, Thèse INSA de Lyon - CEGELY, 2002, 188 p.

M. Lazar, Etude du dopage par implantation ionique d'aluminium dans le carbure de Silicium pour la réalisation de Composants de puissance, Thèse INSA de Lyon - CEGELY, 2002, 219 p.

K. Isoird, Etude de la tenue en tension des dispositifs de puissance en carbure de silicium par caractérisations OBIC et électriques, Thèse INSA de Lyon - CEGELY, 2001, 176 p.

L. Ottavianni, Réalisation de jonctions pn dans le carbure de silicium 6H par implantation ionique d'aluminium. These Doct. CEGELY - INSA Lyon. 1999, 240p.

Dispositifs de l'électronique de puissance. Volume 1. J. ARNOULD & P. MERLE. Editions Hermès, Paris, 1992

C. Harris, Pourquoi le SiC. <http://vderycke.free.fr/page-sic.htm>

<http://www.ifm.liu.se/Matephys/>

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/SiC/SiC.html>

D. Tournier, Conception, Réalisation et Caractérisation d'un composant limiteur de courant commandé en Carbure de Silicium et son intégration système. These Doct. CEGELY - INSA Lyon. 2003, 188 p.

L.T. Ngo, Optimisation et réalisation d'une périphérie planar haute tension à poche, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997

C. Dallery, Simulation électrique d'un thyristor en carbure de silicium, DESS EEA de Lyon, 1998



V.A.K. TEMPLE, W. TANTRAPORN, Junction Termination Extension for Near-Ideal Breakdown Voltage in p-n Junction, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol Ed.33, N°10, Octobre 1986, pp 1601-1608.

R. STENGL, U. GOSELE and al, Variation of Lateral Doping as a Field Terminator for High-Voltage Power Devices, IEEE Trans. on Electronics Vol33, N°3, March 1986.

HAMZA YILMAZ, Optimisation and Surface Charge Sensitivity of High-Voltage Blocking Structures with Shallow Junctions, IEEE Trans. on Electronics Vol.38, N°7, July 1991.

