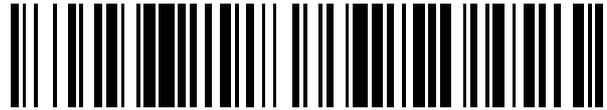


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 466 344**

51 Int. Cl.:

G06F 17/50 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.04.2011 E 11711581 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.03.2014 EP 2556453**

54 Título: **Procedimiento implementado en un ordenador para la simulación numérica de dispositivos semiconductores que contienen uniones túnel**

30 Prioridad:

05.04.2010 EP 10382076

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

10.06.2014

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
(100.0%)**

**Ramiro de Maeztu 7
28040 Madrid, ES**

72 Inventor/es:

**GARCÍA VARA, IVÁN;
ESPINET GONZÁLEZ, PILAR;
ALGORA DEL VALLE, CARLOS;
BAUDRIT, MATHIEU y
REY-STOLLE PRADO, IGNACIO**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 466 344 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento implementado en un ordenador para la simulación numérica de dispositivos semiconductores que contienen uniones túnel.

OBJETO DE LA INVENCION

5 La presente invención está dirigida a un procedimiento implementado en un ordenador para la simulación numérica de un dispositivo semiconductor que contiene una o más uniones túnel y permite la simulación de toda la gama de funcionamiento de la unión túnel.

10 El procedimiento está basado en un modelo distribuido en el que la unión túnel puede integrarse en la simulación mediante circuitos electrónicos distribuidos de un dispositivo semiconductor y, especialmente, de células solares de múltiples uniones.

El dicho procedimiento se usa para solventar los problemas de convergencia detectados hasta la fecha y permite, en particular, la descripción completa del comportamiento experimental de las células solares de múltiples uniones y, por extensión, de cualquier tipo de dispositivo semiconductor que contiene uniones túnel.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

15 En la última década, la eficacia de los dispositivos semiconductores con uniones túnel y, en particular, de células solares de múltiples uniones, ha aumentado considerablemente. Uno de los aspectos principales de esta mayor eficacia han sido las mejoras en la fabricación de las uniones túnel que conectan de manera monolítica cada subcélula [M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki, "Super high-efficiency multi-function and concentrator solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90 (18-19), páginas 3068 a 3077 (2006)].

20 Los modelos de simulación son fundamentales para un entendimiento minucioso de los principios de funcionamiento de las células solares de múltiples uniones, así como para su diseño y fabricación óptimos. Dos son los procedimientos de simulación más robustos:

- 1) Simulación numérica de las ecuaciones diferenciales que describen el dispositivo semiconductor.
- 2) Simulación mediante circuitos electrónicos distribuidos.

25 Las simulaciones numéricas consisten en dividir la célula solar en partes con condiciones de contorno apropiadas que permiten resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el dispositivo semiconductor, normalmente las ecuaciones de continuidad para los portadores minoritarios y la ecuación de Poisson. [S.J. Fonash, *Solar Cell Device Physics*, Academic Press, Nueva York (1981)]. De esta manera, la respuesta eléctrica de la célula solar puede conocerse para condiciones de iluminación y polarización eléctrica dadas. [H. Eschrich, A. Ringhandt, B. Reinicke, G. Nishwitz, H.G. Wagenmann, "Analysis of the Window Layer of $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ Solar Cells aided by Numerical Simulation", actas de la décimo primera Conferencia Europea de Especialistas Fotovoltaicos, páginas 897 a 900, 1992].

35 En la simulación distribuida que usa componentes electrónicos, la célula solar se divide en pequeñas partes, denominadas unidades elementales. Un circuito equivalente está asignado a cada unidad elemental, dependiendo de sus características geométricas y su posición dentro del área de la célula solar (normalmente el perímetro, el área cubierta o el área expuesta). Por consiguiente, toda la célula solar se modela usando el circuito resultante obtenido mediante la interconexión de circuitos de todas las unidades elementales, uniendo entre sí unidades adyacentes. [B. Galiana, C. Algora, I. Rey-Stolle, I. García, "A 3D model for concentrator solar cells based on distributed circuit units". *IEEE Trans. Electron Devices* 52 (12), páginas 2552 a 2558 (2005)].

40 A diferencia de la simulación mediante la resolución de ecuaciones diferenciales, las principales ventajas de las simulaciones mediante circuitos electrónicos distribuidos son fundamentalmente dos: a) un coste computacional considerablemente inferior que permite, entre otras cosas, la simulación de dispositivos semiconductores con un área relativamente grande (decenas de milímetros cuadrados, incluso centímetros), a diferencia del tamaño reducido (del orden de la décima parte de un milímetro) que puede simularse con las simulaciones numéricas de las ecuaciones diferenciales; b) no es necesario conocer todas las características ópticas y eléctricas de los materiales que componen el dispositivo, sino solo su comportamiento relevante para el circuito electrónico equivalente.

45 Estas ventajas han hecho posible la predicción de la respuesta eléctrica de la célula solar en diferentes condiciones de iluminación y polarización [I. García, C. Algora, I. Rey-Stolle y B. Galiana, "Study of non-uniform light profiles on high concentration III-V solar cells using quasi-3D distributed models", Actas de la trigésimo tercera Conferencia de Especialistas Fotovoltaicos IEEE, San Diego, EE. UU. (2008)], la cual no se ha conseguido todavía de manera satisfactoria usando las ecuaciones diferenciales del dispositivo semiconductor.

A pesar de estas ventajas de la simulación distribuida mediante circuitos electrónicos, hasta la fecha no se ha desarrollado ningún modelo para una unión túnel en un dispositivo semiconductor y, en particular, de una célula solar que considera todas las gamas de funcionamiento posibles descritas por su curva I-V (por curva I-V se entiende la característica de corriente-tensión de, en este caso, la unión túnel).

5 La curva I-V de característica de la unión túnel tiene diferentes regiones de funcionamiento, en particular:

- a) región óhmica, que corresponde a una primera región con un comportamiento similar al comportamiento lineal y con una pendiente positiva hasta un valor de corriente denominado corriente de pico.
- b) región de resistencia negativa, que empieza en la corriente de pico y desciende con una pendiente negativa hasta que se alcanza un mínimo local, denominado corriente de valle.
- 10 c) región de exceso de corriente, que empieza en la corriente de valle y presenta una pendiente positiva y,
- d) región de diodo, que presenta una pendiente más pronunciada que la región de exceso de corriente, presentando un comportamiento exponencial.

15 Por lo tanto, en la simulación de la unión túnel se produce frecuentemente un problema de convergencia, ya que para algunos valores de la corriente (producidos, por ejemplo, por una condición de iluminación dada en el caso de la célula solar) la unión túnel puede tener diferentes valores de tensión posibles para el mismo nivel de corriente. En términos matemáticos, en esta situación la tensión es una función multievaluada con respecto a la corriente. Por este motivo, hasta ahora la unión túnel se ha modelado como un cortocircuito [K. Nishioka, T. Takamoto, W. Nakajima, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, T. Fuyuki, "Analysis of triple-junction solar cell under concentration by spice", actas de la tercera Conferencia Mundial sobre Conversión de Energía Fotovoltaica, páginas 869 a 872 (2003)] o como una resistencia [I. Rey-Stolle, C. Algora, I. García, M. Baudrit, P. Espinet, B. Galiana y E. Barrigon, "Simulating III-V concentrator solar cells: a comparison of advantages and limitations of lumped analytical models, distributed analytical models and numerical simulations", Actas de la trigésimo quinta Conferencia de Especialistas Fotovoltaicos IEEE, Filadelfia, EE.UU., 2009]. Sin embargo, estas aproximaciones solo son válidas cuando la corriente generada por la célula solar es menor que la corriente de pico, I_p , de la unión túnel.

25 De hecho, lo que es deseable en el caso de las células solares es que funcionen en la región óhmica, donde el comportamiento de la curva es siempre creciente.

Las unidades elementales conocidas comprenden modelos para cada parte del dispositivo semiconductor. Los modelos usados reproducen el comportamiento de cada una de estas partes y no presentan problemas de convergencia durante la resolución de las ecuaciones resultantes.

30 Casos similares a esta invención, en los que se propone un procedimiento para la simulación precisa de una estructura o parte de un dispositivo semiconductor, ya han sido el objeto de una patente. Por ejemplo, la patente US5535146 describe un procedimiento para producir un dispositivo semiconductor usando un enfoque de simulación lógica para simular un circuito electrónico basado en diodos túnel resonantes (RTD) de múltiples picos, un modelo RTD de múltiples picos y señal de gran amplitud para el programa informático de simulación SPICE (un programa comercial usado ampliamente en la simulación de circuitos) para la simulación lógica que solventa los problemas de convergencia durante la simulación, garantiza la simulación precisa del funcionamiento de circuitos electrónicos y facilita la transmisión de datos de circuito a un ordenador que tiene instalado el programa informático de simulación SPICE.

40 Asimismo, en la patente US6161212 se describe un modelo de un semiconductor mediante una capacitancia de unión en paralelo con una resistencia de unión y una inductancia de unión. La capacitancia, resistencia e inductancia de unión dependen de la tensión de la unión de semiconductor y se determinan mediante la probabilidad de carga almacenada en la unión. Los parámetros de la unión se determinan mediante procedimientos para la extracción de tales parámetros. Se usa un programa de simulación de circuitos para determinar el funcionamiento de un circuito que incluye la unión túnel. Por consiguiente, los diodos de unión se modelan de manera más precisa para tensiones que superan la tensión incorporada y que están por debajo de la tensión de ruptura.

45 La presente invención da a conocer un procedimiento para la simulación numérica de un dispositivo semiconductor que comprende un modelo para la unión túnel, pudiendo aplicarse en particular en células solares de múltiples uniones, de manera que puede simularse sin problemas de convergencia para cualquier gama de funcionamiento de la unión túnel.

50 Asimismo, como se mostrará posteriormente, el procedimiento según esta invención también permite la simulación de una célula solar de múltiples uniones en condiciones de funcionamiento reales, tales como perfiles de irradiación de luz no uniformes, la presencia de gradientes de temperatura, etc., pudiendo aplicarse también este procedimiento a cualquier otro dispositivo semiconductor que contenga uniones túnel.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La presente invención consiste en un procedimiento implementado en un ordenador para la simulación numérica de un dispositivo semiconductor que comprende una o más uniones túnel, tal como una célula solar de múltiples uniones.

- *El dispositivo semiconductor presenta un plano principal y se describe mediante un modelo que incluye unidades de circuito distribuidas a lo largo de este plano principal que comprende unidades de circuito elementales interconectadas.*

El dispositivo está formado por una estructura semiconductor que puede describirse fundamentalmente mediante capas, donde cada capa tiene una función específica. El plano principal es un plano de referencia, de manera que las capas están dispuestas esencialmente en paralelo a este plano principal. Este plano principal se representa normalmente de manera horizontal y la dirección transversal que atraviesa la estructura semiconductor se representa de manera vertical.

El procedimiento de la invención usa un modelo basado en circuitos de componentes electrónicos, pudiendo trabajar con dicho modelo en lugar de con el dispositivo mediante simulaciones, lo que permite, entre otras cosas, optimizar su rendimiento. Según el modelo basado en circuitos de componentes electrónicos, el dispositivo se divide en unidades elementales que están distribuidas por toda el área del plano principal del dispositivo semiconductor.

A su vez, cada una de estas unidades elementales simula el comportamiento del dispositivo semiconductor (considerando cada una de las capas que forman el semiconductor) hasta cierto punto. Si, por ejemplo, el dispositivo semiconductor es una célula solar, se distingue entre unidades elementales para modelar regiones perimetrales, unidades elementales para modelar regiones internas no iluminadas debido a la presencia de regiones metálicas opacas que sirven como colectores de la corriente generada (los denominados bus y rejilla frontal), o unidades elementales para modelar regiones iluminadas. Cada unidad elemental está formada por circuitos, de manera que pueden calcularse corrientes y tensiones en diferentes partes del circuito, es decir, en casi todas las capas semiconductoras del dispositivo físico.

En la descripción de la implementación de esta invención, presentada posteriormente, las unidades elementales usadas se explicarán con un ejemplo.

- *El modelo comprende al menos unidades elementales que modelan las regiones perimetrales y unidades elementales que modelan regiones internas del dispositivo semiconductor.*

En el caso más general, se distingue entre diferentes tipos de unidades elementales usadas en las regiones internas de la célula solar, donde cada unidad elemental está relacionada con las unidades elementales circundantes y las unidades elementales usadas para las regiones perimetrales, donde las unidades elementales no presentan otras unidades elementales adyacentes en la región externa.

- *El comportamiento de cada unidad elemental describe la estructura transversal del dispositivo semiconductor en un punto del plano principal asociado a dicha unidad elemental y se representa mediante un conjunto de módulos elementales interconectados, donde cada uno está asociado a un efecto o componente físico del dispositivo semiconductor en la dirección transversal, y donde cada módulo está formado por al menos un componente electrónico simple.*

Ésta es la manera usada por este procedimiento según el estado de la técnica, conociéndose diferentes módulos dependiendo de la función de cada capa del dispositivo semiconductor.

Los módulos están interconectados de manera vertical (en la dirección perpendicular al plano principal del dispositivo).

En la presente invención, el módulo usado para el modelo de unión túnel está caracterizado, como se mostrará posteriormente.

El comportamiento global del dispositivo semiconductor se simula siguiendo las siguientes etapas:

- *Se genera un circuito que resulta de conectar todas las unidades elementales.*
Cada uno de los módulos está interconectado para formar una unidad elemental. A su vez, las unidades elementales están interconectadas formando un único circuito que representa todo el dispositivo semiconductor.

- *Se obtiene un sistema de ecuaciones no lineal asociado al circuito, así como las variables no conocidas, es decir, las tensiones y las corrientes.*

En esta etapa se define el sistema de ecuaciones que permite la determinación de las variables más relevantes (las tensiones y las corrientes). Este sistema de ecuaciones no es lineal debido, entre otras cosas, a la presencia de módulos en las unidades elementales con un comportamiento no lineal, y también debido a la posible dependencia de algunos componentes en los valores de las variables no conocidas, por ejemplo cuando el valor de una resistencia depende de la tensión en sus terminales.

- *Se realiza una estimación inicial de las tensiones y corrientes no conocidas.*
Al igual que en cualquier procedimiento numérico iterativo, se necesita un valor inicial para las variables, la estimación inicial, para las variables no conocidas con el fin de iniciar el procedimiento iterativo.
- *El sistema se resuelve mediante un procedimiento iterativo hasta el cumplimiento de una condición de*

parada.

Por ejemplo, un procedimiento iterativo basado en el algoritmo de Newton-Raphson que presenta un comportamiento razonable en cuanto a la convergencia.

Una vez establecidas las etapas del procedimiento, se caracteriza mediante la incorporación de un módulo que modela la unión túnel usando una combinación de un elemento funcional y una o más resistencias colocadas en paralelo al plano principal del dispositivo semiconductor. El elemento funcional permite fijar el comportamiento de la unión túnel al comportamiento real observado en este tipo de uniones; sin embargo, dicho comportamiento impide la convergencia de los procedimientos iterativos clásicos. Sin embargo, la combinación de resistencias usadas en el módulo mejora el comportamiento numérico, evitando la divergencia de los procedimientos iterativos, mientras que permite la simulación de dispositivos en los que la influencia del comportamiento de la unión túnel es importante.

De esta manera, el procedimiento se caracteriza porque las unidades elementales incorporan como modelo para la unión túnel una combinación de:

- *Un elemento funcional que tiene en cuenta la relación entre la corriente y la tensión (I-V) descrita mediante una curva de característica que comprende cuatro regiones consecutivas:*
 - a) *una región óhmica, con pendiente positiva hasta que se alcanza un determinado valor de corriente de pico,*
 - b) *una región de resistencia negativa, que parte de la corriente de pico y desciende con una pendiente negativa hasta un mínimo local o corriente de valle,*
 - c) *una región de exceso de corriente, que parte del valor de la corriente de valle y muestra una pendiente positiva; y,*
 - d) *una región de diodo que presenta una pendiente más pronunciada que la región de exceso de corriente.*
- *Una o más resistencias distribuidas a lo largo del plano principal que permiten el flujo de corriente entre unidades elementales adyacentes.*

Además de proporcionar un modelo más realista, estas resistencias laterales permiten resolver el circuito electrónico completo sin problemas de convergencia. Asimismo, este modelo es más realista porque esta(s) resistencia(s) distribuida(s) a lo largo del plano principal permite(n) reproducir corrientes que se generan en la unión y fluyen hacia otras ubicaciones a través de la misma capa. En lo que respecta al problema de la convergencia, se soluciona usando la combinación del elemento funcional con la(s) resistencia(s), produciéndose dicha convergencia en una etapa determinada del proceso iterativo; cuando la corriente que atraviesa el dispositivo semiconductor (por ejemplo, una célula solar) es mayor que la corriente de pico de la unión túnel, no se produce ningún cambio de tensión brusco. Por ejemplo, cuando se usan algoritmos de Newton-Raphson, estos cambios producirán importantes diferencias entre las soluciones y, por lo tanto, harán que el procedimiento diverja. La transición entre iteraciones se lleva a cabo con pequeñas variaciones de los valores de las variables no conocidas, gracias a que la corriente puede fluir de manera horizontal, a través de dichas resistencias, hacia regiones del dispositivo semiconductor con un flujo de corriente vertical más bajo. El resultado experimental global observado es que se solventa la divergencia del procedimiento, pudiendo encontrar una solución para el sistema de ecuaciones.

En la explicación detallada de una realización a modo de ejemplo se mostrará un ejemplo de convergencia.

En esta descripción también se consideran como referencia procedimientos resultantes de diferentes combinaciones de las reivindicaciones dependientes 2 a 7.

Un objeto adicional de esta invención es el producto constituido por un programa informático adaptado para ejecutar cualquiera de los procedimientos descritos en este documento.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Éstas y otras características y ventajas de la presente invención resultarán evidentes a partir de la descripción detallada de un ejemplo de realización preferida, que se proporciona solamente como un ejemplo ilustrativo y no limitativo con referencia a las figuras adjuntas.

Figura 1 En esta figura se muestra un esquema de una sección de un dispositivo semiconductor usado como una realización a modo de ejemplo. Este ejemplo es una célula solar de tripe unión en la que tres subcélulas y las dos uniones túnel que las interconectan se detallan en el mismo. La figura se ha aumentado en la dirección transversal (la dirección vertical en el dibujo) con el fin de resaltar cada una de sus partes.

Figura 2 Representación esquemática del modelo usado para la resolución mediante circuitos de componentes electrónicos distribuidos. La figura muestra un conjunto de unidades elementales que, una vez interconectadas, producen un circuito con un comportamiento equivalente.

- Figura 3 En esta figura se muestra la curva I-V (corriente-tensión) obtenida de manera experimental en la unión túnel con una corriente de pico (I_p) de 10 A, en la que se presentan las cuatro regiones de funcionamiento, delimitadas por la corriente de pico y la tensión de pico (I_p, V_p) y la corriente de valle y la tensión de valle (I_v, V_v). Esta curva se usará en los experimentos correspondientes a la figura 8.
- Figura 4 En esta figura se muestra la curva I-V de la unión túnel usada en la realización a modo de ejemplo, en la que se han llevado a cabo experimentos numéricos para probar el comportamiento frente a la convergencia.
- Figura 5 De izquierda a derecha se muestra el esquema de unidades elementales correspondiente a áreas iluminadas (U.2.1), áreas oscuras (U.2.2), siendo ambas regiones internas, y el perímetro (U.1) de una célula solar de doble unión que contiene una unión túnel. El significado de los componentes incluidos es:
- r_M , resistencia lateral metálica (Ω)
 - r_{FC} , resistencia vertical de capa de contacto delantero (Ω)
 - r_{ETC} , resistencia lateral de emisor de subcélula superior (Ω)
 - r_{BTC} , resistencia lateral de base de subcélula superior (Ω)
 - r_{VTC} , resistencia vertical de subcélula superior (incluyendo la resistencia vertical de la base y BSF "campo de superficie trasera" de la célula superior) (Ω)
 - I_{01TC} , densidad de corriente de recombinación de regiones neutras de célula superior (A/cm^2)
 - I_{02TC} , densidad de corriente de recombinación de regiones de carga de espacio de célula superior (A/cm^2)
 - r_{pTC} , resistencia en derivación de subcélula superior (Ω)
 - I_L , densidad de fotocorriente generada (A/cm^2)
 - I_{TJ} , densidad de corriente de unión túnel (A/cm^2)
 - r_{EBC} , resistencia lateral de emisor de subcélula inferior (Ω)
 - r_{BBC} , resistencia lateral de base de subcélula inferior (Ω)
 - r_{VBC} , resistencia vertical de subcélula inferior (incluyendo la resistencia vertical de la base y BSF "campo de superficie trasera" de la célula inferior) (Ω)
 - I_{01BC} , densidad de corriente de recombinación de regiones neutras de célula inferior (A/cm^2)
 - I_{02BC} , densidad de corriente de recombinación de regiones de carga de espacio de célula inferior (A/cm^2)
 - r_{pBC} , resistencia en derivación de célula inferior (Ω)
- Figura 6 En esta figura se muestra una realización a modo de ejemplo del módulo que permite caracterizar la unión túnel combinando un elemento funcional, que reproduce la curva I-V de característica de la unión túnel, y varias resistencias.
- Figura 7 En esta figura se observa un comportamiento diferente en lo que respecta a la convergencia de la célula solar considerada en la realización a modo de ejemplo cuando el modelo incorpora resistencias distribuidas a lo largo del plano principal y viceversa.
- Figura 8 Esta figura muestra ejemplos de curva I-V obtenidos de la célula solar usada en la realización a modo de ejemplo de una célula solar de doble unión que incluye una unión túnel caracterizada por un elemento funcional según las curvas mostradas en la Figura 3, con el fin de ilustrar el rendimiento del objeto de modelo de la presente invención dado que permite reproducir el comportamiento real, el cual no puede reproducirse de otra manera.
- Figuras 9A, 9B, 10A, 10B, 11 y 12 En todas estas figuras se muestran se muestran gráficos de color falso (en escala de grises) de la tensión en la unión túnel, en simulaciones de células solares (con un área de $1mm^2$) en las que corriente de la célula solar es mayor que la corriente de pico de la unión túnel. Las Figuras 9A, 10A, 11 y 12 corresponden a simulaciones en las que el módulo de circuito asociado a la unión túnel incorpora resistencias horizontales según una realización de la invención, en las que se observa la convergencia del procedimiento. La Figura 9A muestra los resultados de una simulación en la que la tensión en los terminales es de 2,50 V. La Figura 10A muestra los resultados de una simulación en la que la tensión en los terminales es de 2,45 V. La Figura 11 muestra los resultados de una simulación en la que la tensión en los terminales es de 2,40 V. La Figura 12 muestra los resultados de una simulación en la que la tensión en los terminales

es de 2,10 V.

Las Figuras 9B y 10B corresponden a simulaciones en las que el módulo de circuito asociado a la unión túnel no contiene resistencias horizontales, mostrándose cambios de tensión bruscos, que impiden la convergencia del procedimiento de cálculo iterativo.

5 La Figura 9B muestra los resultados de una simulación en la que la tensión en los terminales de la célula solar es de 2,50 V.

La Figura 10B muestra los resultados de una simulación en la que la tensión en los terminales es de 2,45 V.

10 Para valores de 2,40 V y 2,10 V no hay gráficos como los mostrados en las Figuras 9B y 10B debido a la no convergencia provocada por la ausencia de resistencias horizontales.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCIÓN

15 La presente invención consiste en un procedimiento implementado en un ordenador, para la simulación numérica de un dispositivo semiconductor que comprende una o más uniones túnel. Este dispositivo semiconductor es preferentemente una célula solar, y éste es el caso en la realización a modo de ejemplo considerada en esta descripción detallada de la invención, aunque puede aplicarse a cualquier otro dispositivo semiconductor.

20 Según la presente invención, la simulación de un dispositivo semiconductor que comprende una o más uniones túnel puede realizarse antes de la fabricación del dispositivo con el fin de garantizar el mejor rendimiento antes de su fabricación, o después, con el objetivo de corregir las posibles anomalías encontradas. También se usa para fijar y extraer parámetros de las curvas experimentales y también para optimizar el dispositivo con el fin de lograr un mayor rendimiento en determinadas condiciones de funcionamiento reales.

La Figura 1 muestra la estructura de una célula solar, el dispositivo físico que será modelado para simular su comportamiento. De esta manera, el dispositivo físico es sustituido por su modelo para calcular las variables deseadas, como las tensiones y las corrientes.

25 La estructura estratificada de la célula solar está formada por las siguientes partes, enumeradas de manera ascendente según la disposición mostrada en la figura:

- un contacto trasero (7),
- un sustrato (6),
- una subcélula inferior (5),
- una primera unión túnel (3),
- 30 • una subcélula central (4),
- una segunda unión túnel (3),
- una subcélula superior (2),
- un contacto delantero (1).

35 Además, la subcélula superior (2) puede estar dotada de un revestimiento antirreflectante. El contacto delantero (1) y el contacto trasero (7) permiten la extracción de la corriente generada por el dispositivo semiconductor. La célula solar muestra un plano principal, de manera que cada parte descrita está dispuesta en paralelo a este plano principal. Puede haber casos en los que este plano puede adoptar un determinado grado de curvatura o flexión; sin embargo, seguirá identificándose una superficie principal y una dirección transversal (perpendicular a este plano) que, en todos los casos, se mostrará como la dirección vertical.

40 Una vez establecida la estructura de célula solar que va a simularse, se lleva a cabo la discretización o división en unidades elementales (U). Estas unidades elementales se han representado como prismas de manera que la disposición de todos estos prismas cubre toda el área del plano principal de la célula solar, así como su estructura transversal. Cada unidad elemental (U) representa la estructura de célula solar según sus capas constituyentes. En la Figura 2 se han diferenciado las unidades elementales (U) ubicadas en la periferia de la célula solar (U.1) y las unidades elementales ubicadas dentro (U.2).

El proceso de simulación se lleva a cabo siguiendo estas etapas:

- Se genera el modelo distribuido para el dispositivo semiconductor, en particular el de la realización a modo de ejemplo que es una célula solar de doble unión (o cualquier otro dispositivo semiconductor) basada en una pluralidad de circuitos electrónicos. Los circuitos electrónicos se seleccionan para reproducir el comportamiento eléctrico de cada una de las capas y estructuras que componen el dispositivo semiconductor. Algunas de éstas corresponden a la unión túnel. Estos circuitos elementales se denominarán módulos elementales. Por tanto, una unidad elemental (U) está formada por la combinación de todos los módulos elementales que reproducen la estructura transversal del dispositivo semiconductor (en esta realización a modo de ejemplo, la célula solar).
- Los datos apropiados para cada componente electrónico de los circuitos eléctricos se introducen en el modelo. Este ajuste no es solamente una parametrización apropiada que adapta cada módulo elemental a las

características de la capa que representa y sus interacciones. Se construye todo el circuito resultante equivalente de la célula solar (o cualquier otro dispositivo semiconductor). La Figura 2 muestra cómo en la agrupación de unidades elementales (U), cada unidad elemental (U) está en contacto con las unidades elementales (U) que la rodean. Todo el circuito dependerá de la conexión que resulte en cada circuito elemental conectado a la unidad adyacente.

- 5
- El sistema de ecuaciones correspondiente se genera para resolverse usando un procedimiento iterativo numérico.

En particular, esta última etapa puede llevarse a cabo usando paquetes de software disponibles, tales como SPICE, que son adecuados para la simulación de circuitos electrónicos.

- 10
- En la Figura 3 se muestran todas las regiones de funcionamiento de la unión túnel: región óhmica (I), región de resistencia negativa (II), región de exceso de corriente (III) y región de diodo (IV).

Los módulos usados en el estado de la técnica se basan solamente en una única resistencia y solo pueden modelar la primera región, la región óhmica (I), la cual se aproxima adicionalmente mediante una línea recta.

- 15
- El modelo propuesto en esta invención permite reproducir los parámetros fundamentales de la unión túnel, como la corriente de pico y la tensión de pico (I_p y V_p), así como la corriente de valle y la tensión de valle (I_v y V_v).

- 20
- Como puede observarse, ambos modelos son válidos para corrientes en la célula solar inferiores a la corriente de pico de la unión túnel. Sin embargo, con el modelo tradicional, el efecto de la unión túnel en la curva I-V de característica se ignora cuando la corriente es mayor que la corriente de pico de la unión túnel. Esta limitación se soluciona con el modelo presentado en esta invención, ya que se obtiene una representación más realista de la curva I-V de característica, en concreto teniendo en cuenta la región de resistencia negativa (II), la región de exceso de corriente (III) y la región de diodo (IV), ya que corresponde a mediciones en dispositivos reales.

- 25
- La Figura 4 muestra la curva real usada en la realización a modo de ejemplo de los experimentos diseñados para evaluar la convergencia de los procedimientos iterativos usados para resolver el sistema de ecuaciones. Estos experimentos mostrarán los resultados usando el objeto de modelo de esta invención y el resultado obtenido con un modelo menos avanzado antes de esta invención.

- 30
- Con el ejemplo analizado se demuestra la necesidad de modelar de manera precisa la unión túnel, ya que la configuración de la curva I-V de célula solar afecta a su región de máxima potencia, que es el punto de funcionamiento en el que las células solares están destinadas a funcionar generalmente. Si las peculiaridades de la unión túnel no se tuvieron en cuenta en el modelo, las simulaciones y las predicciones de rendimiento obtenidas de su uso serán incorrectas e inútiles.

- 35
- La Figura 5 muestra tres tipos de unidades elementales (U.1, U.2.1, U.2.2) usadas normalmente en el procedimiento de circuito distribuido. Para simplificar el esquema, en esta figura se muestra el modelado de estas unidades para un dispositivo semiconductor con una única unión túnel. Se supone que la elección de los componentes electrónicos para cada una de las capas, excepto para la unión túnel, está basada en el estado de la técnica actual. Los componentes usados no muestran una curva de característica con una pendiente negativa en ninguna región y, por tanto, no originan problemas de convergencia. La unión túnel es la que muestra este tipo de comportamiento y, por lo tanto, es la que causa los problemas de convergencia cuando se usa un modelo más parecido a la realidad.

- 40
- Los tres tipos de unidades elementales (U) mostrados de izquierda a derecha en la Figura 5 son: una unidad elemental de región interna (U.2.1) que está iluminada, una unidad elemental de región interna (U.2.2) que está en la oscuridad y una unidad elemental (U.1) para la región perimetral. Esta última unidad elemental (U) comprende componentes electrónicos que modelan el comportamiento de la región perimetral, de manera que la unidad (U) no cuenta con ningún enlace hacia el lado derecho. Se observa que ningún componente se aparta del eje central.

- 45
- Un objeto de esta invención es la incorporación de un módulo que comprende los componentes que modelan el comportamiento de la(s) unión(es) de túnel.

El módulo (M) se ilustra en la Figura 6, donde, en esta realización a modo de ejemplo, se observa un cuadro central que, a su vez, relaciona módulos dispuestos arriba y abajo, distribuyéndose las capas de la unión túnel y un conjunto de resistencias (R) de manera horizontal, es decir, paralelas al plano principal.

- 50
- El cuadro central incorpora la función que relaciona la corriente y la tensión, mostrada en las Figuras 3 y 4, que comprende las cuatro regiones de funcionamiento de la unión túnel.

Las resistencias horizontales (R) permiten el flujo de corriente a lo largo de la misma capa del semiconductor.

Esta combinación de un elemento funcional representado por la función según la curva I-V de la unión túnel y la

presencia de al menos una resistencia horizontal (R) es lo que permite el modelado apropiado de la unión túnel y dicho modelado proporciona un sistema que, cuando es resuelto mediante un procedimiento numérico, no muestra problemas de convergencia. Esto es así porque, en cualquier etapa del proceso iterativo que resuelve el sistema de ecuaciones resultante, en la etapa en la que la corriente de célula solar se vuelve más alta que la corriente de pico de unión túnel no se produce ningún cambio de tensión brusco (que pudiera afectar a la convergencia del algoritmo de Newton-Raphson usado), sino que esta transición se lleva a cabo de manera más suave gracias al drenaje de corriente lateral hacia regiones del dispositivo en las que la corriente es menor.

Se han llevado a cabo experimentos que muestran cómo la presencia de las resistencias horizontales (R) permite la convergencia del procedimiento. Los experimentos se han llevado a cabo usando la curva I-V mostrada en la Figura 4, donde la tensión de pico es de 0,1 V y la corriente de pico es de 15,4 A. La convergencia o divergencia del procedimiento se consigue dependiendo de si hay o no resistencias incorporadas (R) dentro del módulo que modela la unión túnel.

La Figura 7 muestra los resultados de dos simulaciones y las Figuras 9A, 9B, 10A, 10B, 11 y 12 muestran el comportamiento de la tensión en la unión túnel para estas simulaciones. En este ejemplo se ha observado que el procedimiento iterativo no converge para tensiones en los terminales de la célula inferiores a 2,45 V cuando no se usan las resistencias laterales (R). Puede observarse que a medida la tensión aplicada a la célula solar pasa de 2,5 V a 2,45 V, la tensión en la unión túnel varía suavemente (Figuras 9A y 10A) cuando se usan resistencias horizontales (R), mientras que sin estas resistencias horizontales (R) la tensión aumenta bruscamente (Figuras 9B y 10B), de manera que para el siguiente punto de tensión del barrido, el algoritmo no puede encontrar un valor de tensión en cada nodo del circuito que sea convergente con el anterior. El gráfico 7 solo puede obtenerse para tensiones inferiores a 2,45 V cuando se usan las resistencias horizontales (R) (Figuras 11 y 12).

Aunque la combinación permite conseguir la convergencia, el uso de la curva I-V para la unión túnel que imita el comportamiento real permite además la simulación de dispositivos semiconductores en condiciones que no han sido posibles hasta ahora.

En la Figura 8 se ilustra la función de las resistencias de flujo de corriente (R) en la unión túnel, no interpretado desde un punto de vista numérico sino desde un punto de vista físico. Esta interpretación va a llevarse a cabo usando de nuevo una célula solar de doble unión como un ejemplo, cuya I-V de característica se muestra en la Figura 3.

Recientemente se ha observado de manera experimental que no es estrictamente necesario que la corriente que pasa por la célula solar sea más baja que la corriente de pico de la unión túnel para evitar la aparición de la depresión en la curva I-V de célula solar mostrada en la Figura 8 [A. Braun, B. Hirsh, E. A. Katz, J. M. Gordon, W. Guter y A. W. Bett, "Localized irradiation effects on tunnel diode transitions in multi-junction concentrator solar cells", Solar Energy Material & Solar Cells, 93 (2009), 1692 a 1695], pero el origen de este fenómeno no se ha demostrado de manera concluyente.

Dicho fenómeno puede explicarse gracias a la presente invención de la siguiente manera. En la práctica, las células solares comprenden áreas cubiertas con y sin áreas metálicas. Se supone que las áreas cubiertas con metal son regiones en las que no se produce fotogeneración (puesto que están en la oscuridad) y, por tanto, pueden considerarse regiones en las que la corriente de cortocircuito es nula. Por lo tanto, dichas regiones pueden considerarse sumideros de corriente que rebajan de algún modo el requisito de que la corriente de pico de la unión túnel sea igual o superior a toda la corriente de cortocircuito de la célula solar. En la simulación, estos sumideros de corriente no pueden ser eficaces si no se permite el flujo de corriente lateral. Por eso, este efecto no puede explicarse con el modelo tradicional para la unión túnel que consiste en una resistencia. Por el contrario, la presente invención contempla el flujo de corriente lateral de manera que, aunque sea baja, la corriente de túnel que puede drenar la unión túnel de manera horizontal hacia áreas oscuras es suficiente para permitir que la curva I-V de célula solar no presente la depresión para valores de corriente superiores a la corriente de pico de unión túnel, como se ha observado de manera experimental. Esto puede observarse además en el resultado de simulación para una corriente de célula solar de 11A superior a la corriente de pico de la unión túnel ($I_p=10A$).

Un objeto adicional de la presente invención es un módulo (M) en el que el valor de las resistencias (R) depende de la temperatura o de la tensión. En este caso, el módulo (M) permite simular situaciones en las que puede producirse una falta de homogeneidad en todo el plano principal debido a estos efectos.

REIVINDICACIONES

1.- Procedimiento implementado por ordenador para la simulación numérica de un dispositivo semiconductor que comprende una o más uniones túnel, preferentemente una célula solar, en el que:

- 5 • el dispositivo semiconductor presenta un plano principal y se describe mediante un modelo que incluye componentes electrónicos distribuidos a lo largo de este dicho plano principal que comprende unidades elementales interconectadas (U),
- el modelo comprende al menos unidades elementales (U.1) que modelan las regiones perimetrales y unidades elementales (U.2) que modelan las regiones internas del dispositivo semiconductor,
- 10 • el comportamiento de cada unidad elemental (U) describe la estructura transversal del dispositivo semiconductor en el punto del plano principal asociado a esa unidad elemental y se representa mediante un conjunto de módulos elementales interconectados, donde cada uno está asociado a un efecto o componente físico del dispositivo semiconductor en la dirección transversal, y donde cada módulo elemental está compuesto de al menos un componente electrónico simple;

donde el comportamiento global del dispositivo semiconductor se simula siguiendo las siguientes etapas:

- 15 • se genera un circuito que se obtiene conectando todas las unidades elementales (U),
- se obtiene un sistema de ecuaciones no lineal asociado al circuito, así como las variables no conocidas, es decir, las tensiones y las corrientes no conocidas,
- se realiza una estimación inicial de las tensiones y corrientes no conocidas,
- el sistema se resuelve mediante un proceso iterativo hasta que se cumple una condición de parada,

20 donde el procedimiento está caracterizado porque las unidades elementales incorporan como el módulo (M) para la unión túnel una combinación de

- un elemento funcional que tiene en cuenta la relación entre la corriente y la tensión $I=f(V)$ descrita mediante una curva de característica que comprende cuatro regiones consecutivas:
 - 25 a) una región óhmica, con pendiente positiva hasta que se alcanza un determinado valor de corriente de pico (I_p),
 - b) una región de resistencia negativa, que parte de la corriente de pico (I_p) y desciende con una pendiente negativa hasta un mínimo local (I_v) o la corriente de valle,
 - c) una región de exceso de corriente, que parte de la corriente de valle (I_v) y muestra una pendiente positiva; y,
 - 30 d) una región de diodo, que presenta una pendiente más pronunciada que la región de exceso de corriente;
- y
- una o más resistencias (R) distribuidas a lo largo del plano principal que permiten el flujo de corriente entre unidades elementales adyacentes.

35 2.- Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que el dispositivo semiconductor es una célula solar y entre las unidades elementales (U) que modelan las regiones internas del dispositivo semiconductor hay unidades elementales (U) para la región en la oscuridad (U.2.2) y unidades elementales para regiones iluminadas (U.2.1).

3.- Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que un procedimiento iterativo está basado en el algoritmo de Newton-Raphson.

40 4.- Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que al menos una de las resistencias (R) en el modelo de unión túnel depende de la temperatura.

5.- Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que al menos una de las resistencias (R) distribuidas a lo largo del plano principal del modelo de unión túnel depende de la tensión.

45 6.- Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que el elemento funcional usado para tener en cuenta la relación entre la tensión y la corriente en la unión túnel, descrita mediante una curva de característica que comprende cuatro regiones consecutivas, se representa mediante una expresión analítica.

7.- Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que el elemento funcional usado para tener en cuenta la relación entre la tensión y la corriente en la unión túnel, descrita mediante una curva de característica que comprende cuatro regiones consecutivas, se representa mediante una tabla de consulta.

50 8.- Un producto que comprende un programa de software que comprende instrucciones de ordenador para ejecutar cualquiera de los procedimientos según las reivindicaciones 1 a 7.

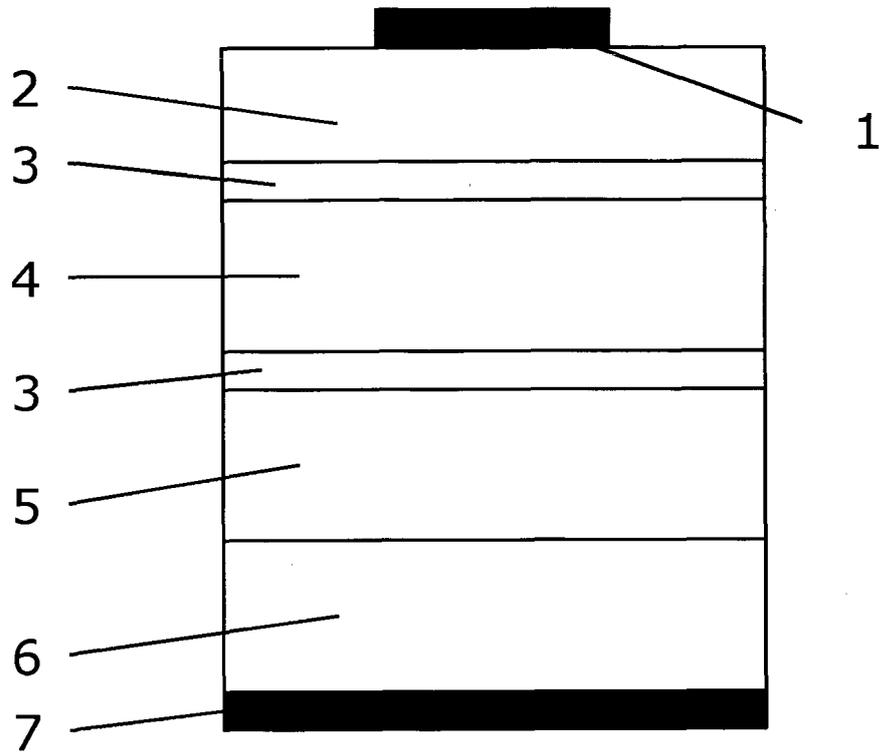


FIG. 1

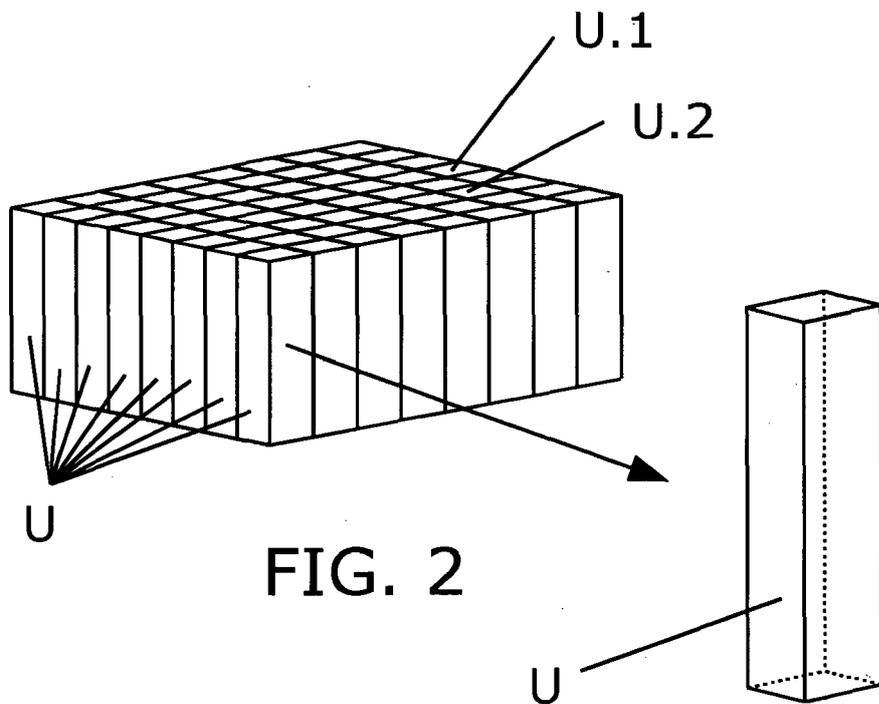


FIG. 2

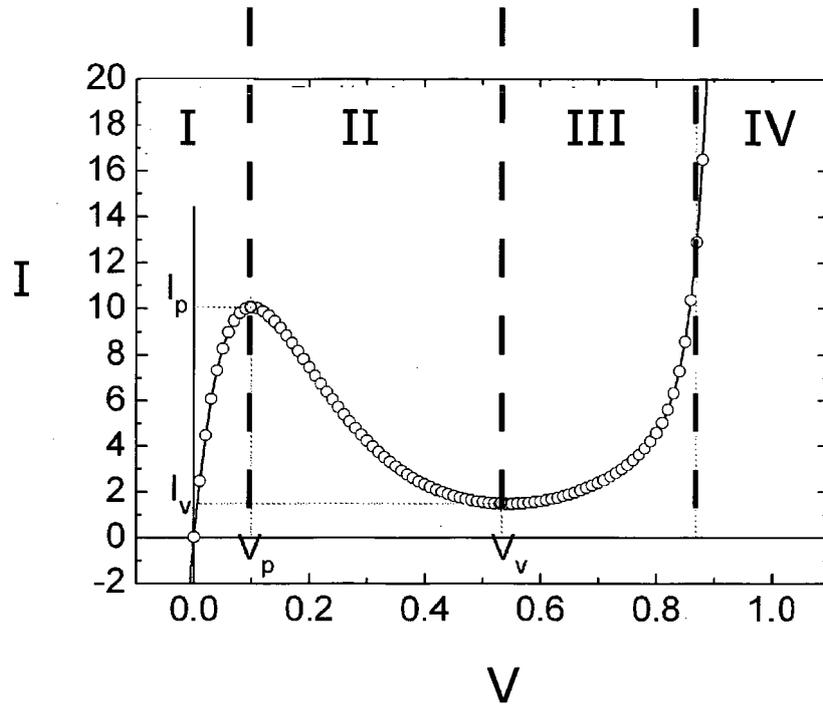


FIG. 3

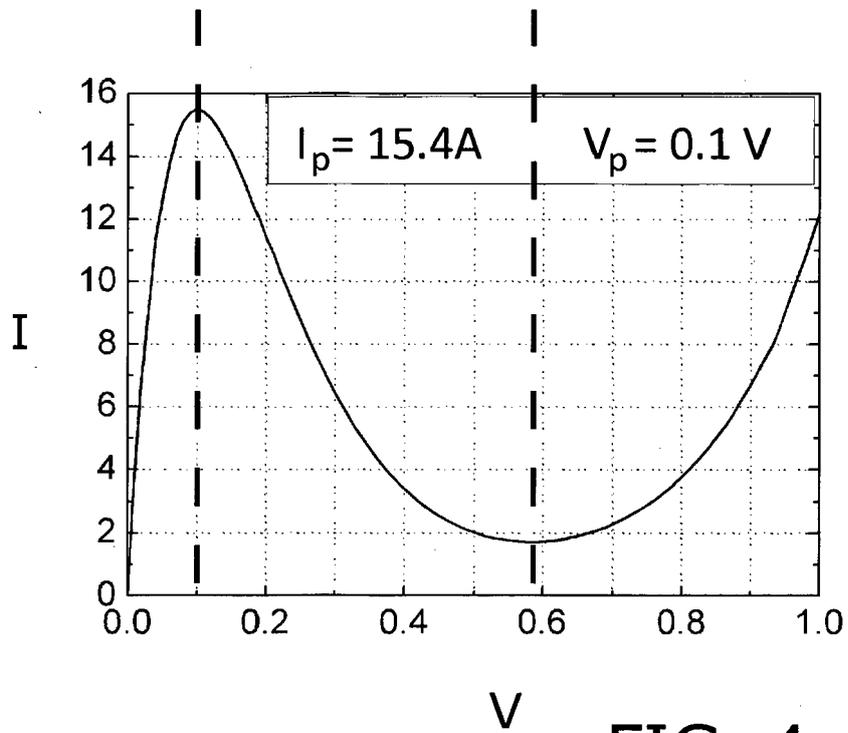
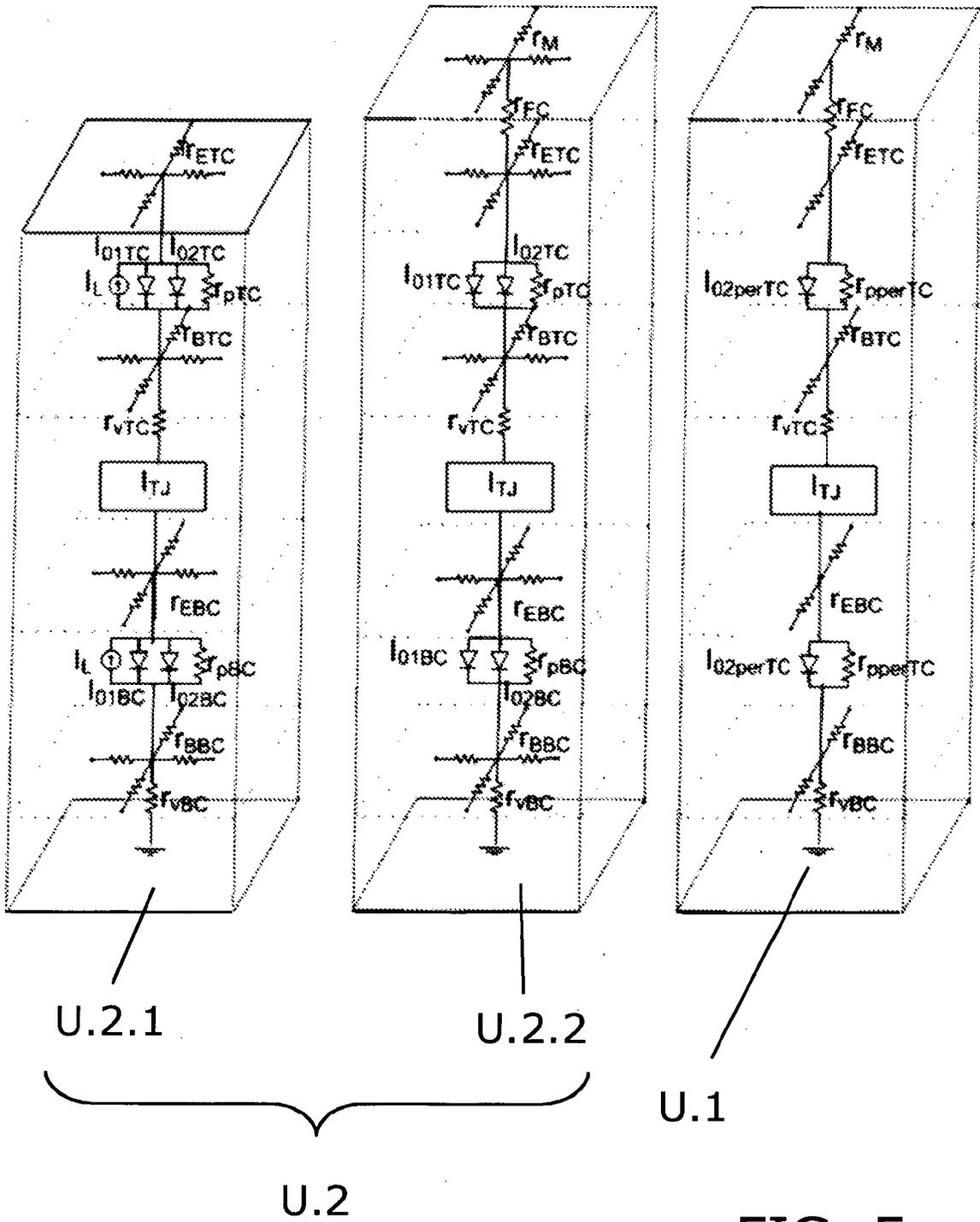


FIG. 4



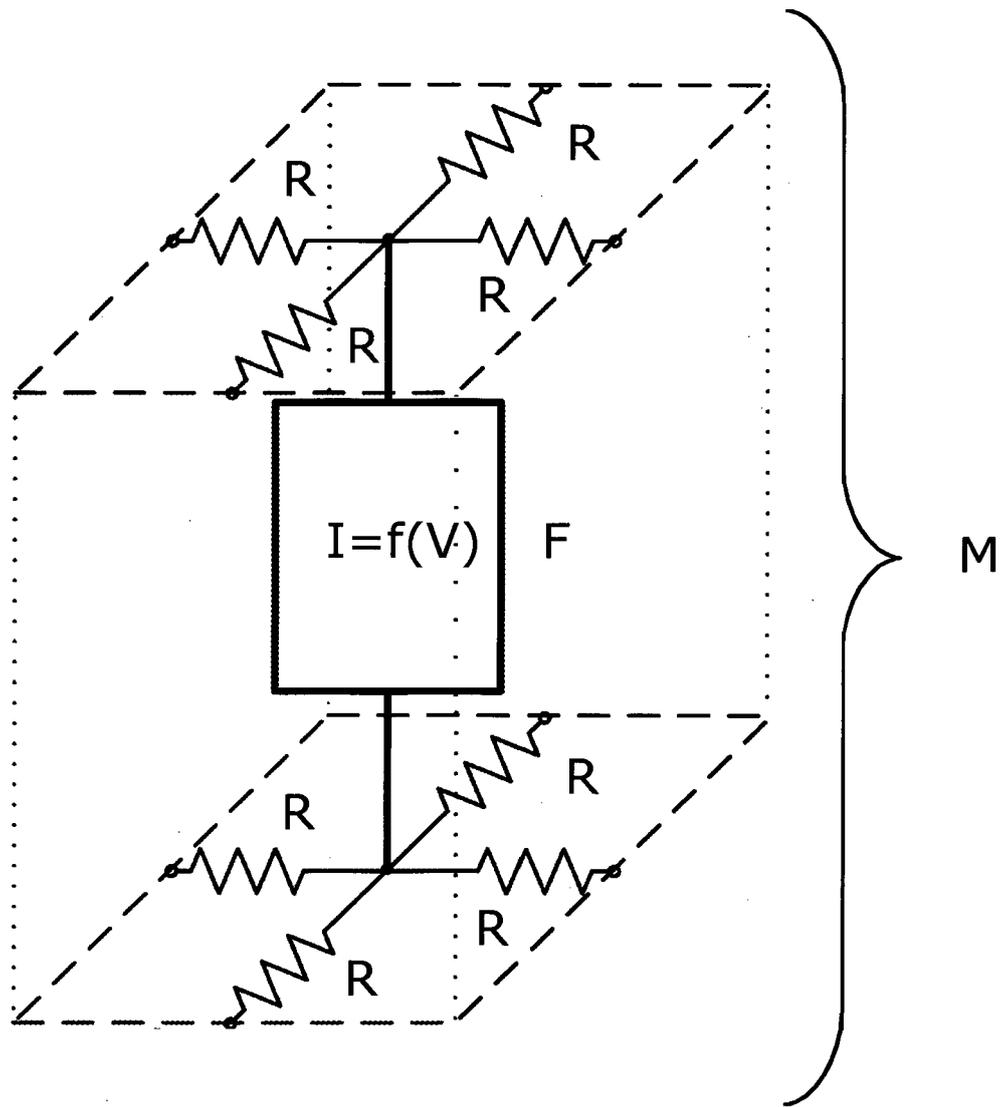


FIG. 6

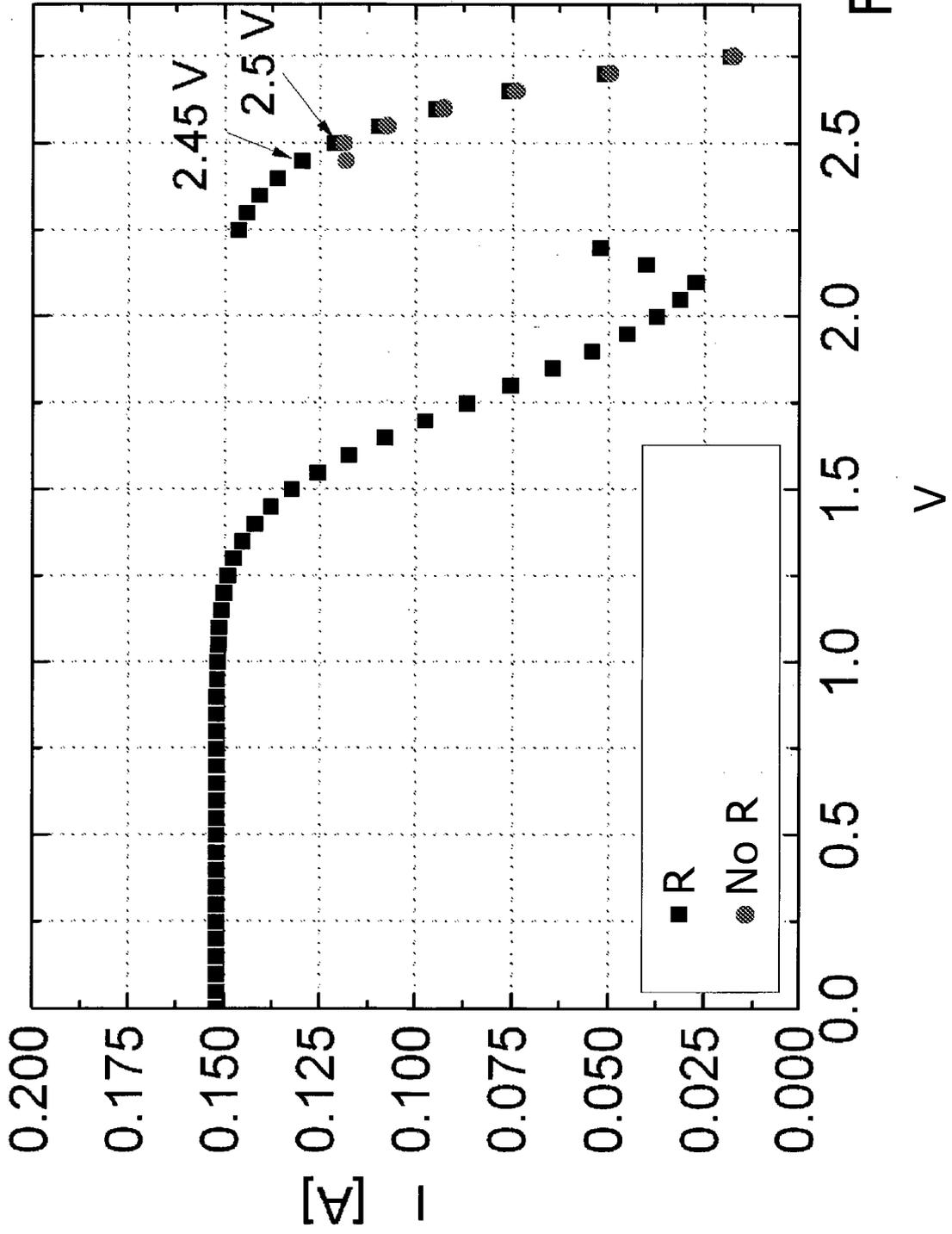


FIG. 7

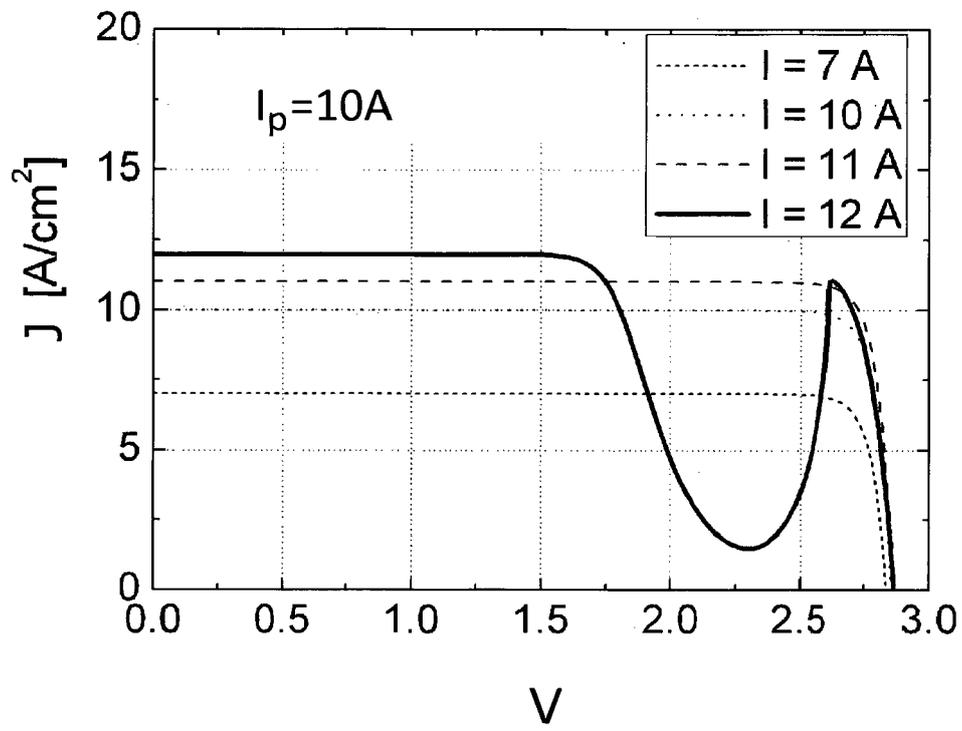


FIG. 8

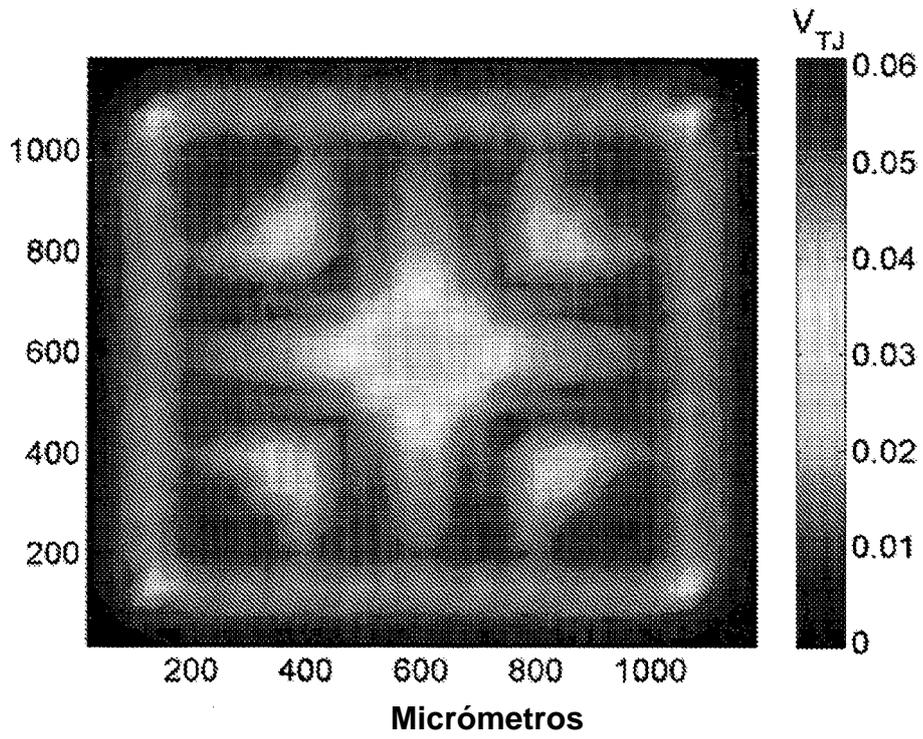


FIG. 9A

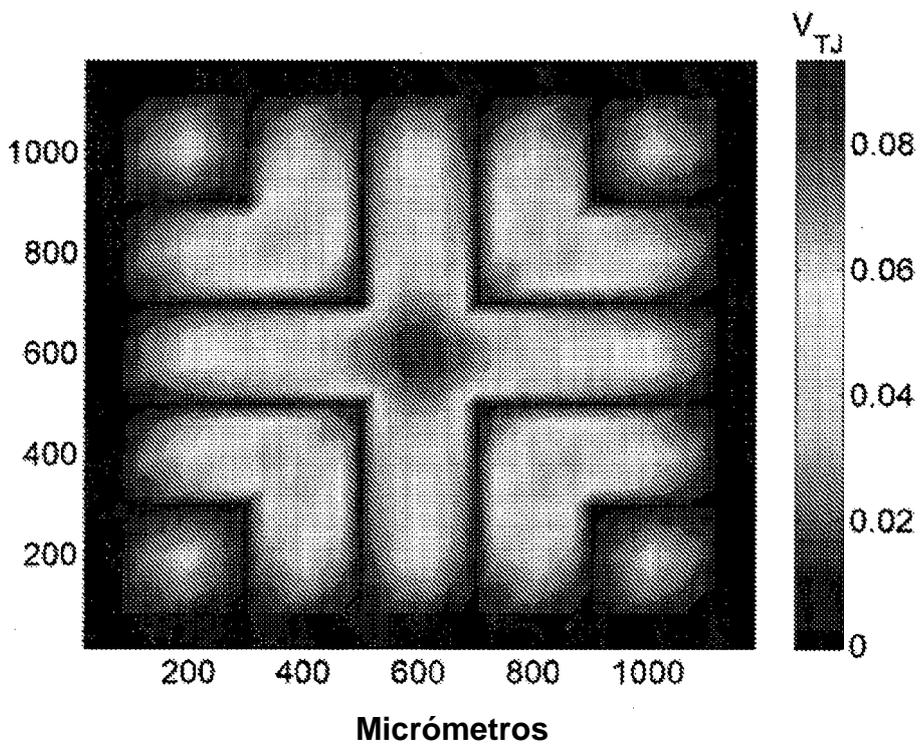


FIG. 9B

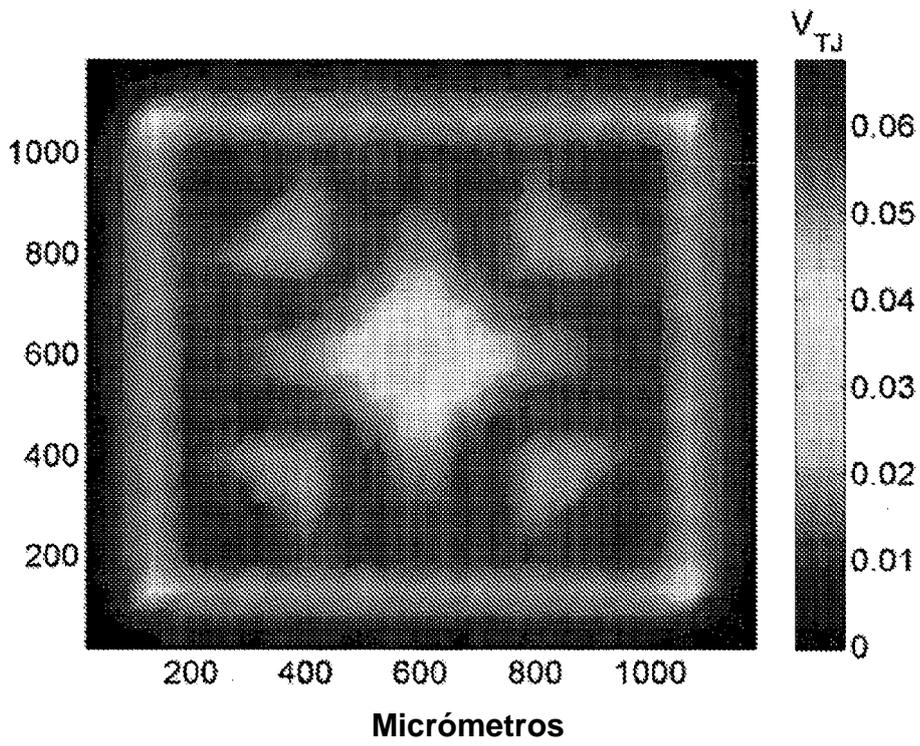


FIG. 10A

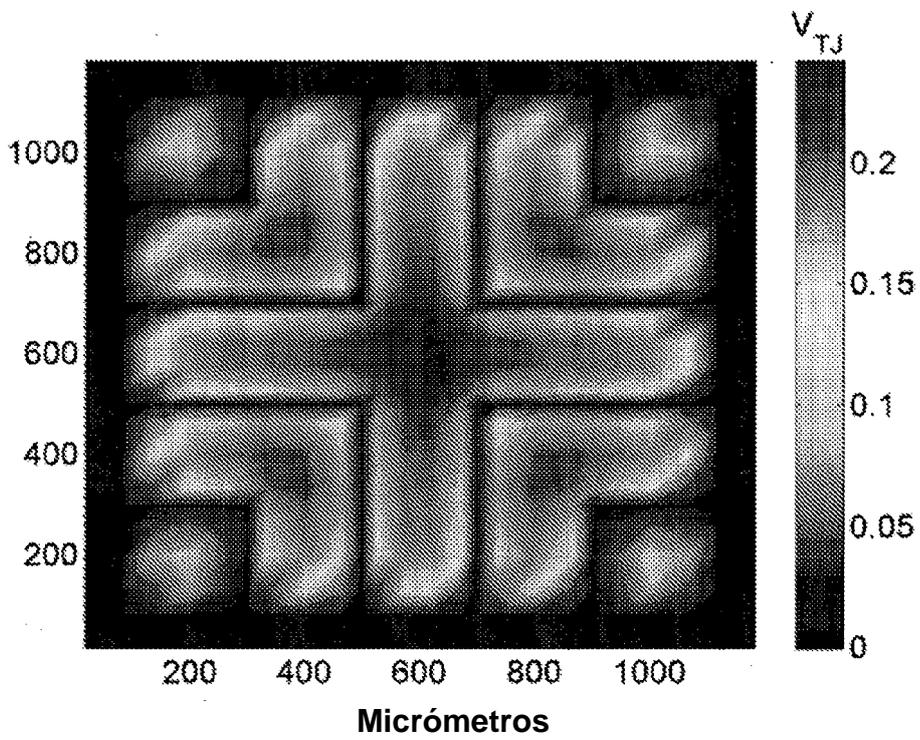


FIG. 10B

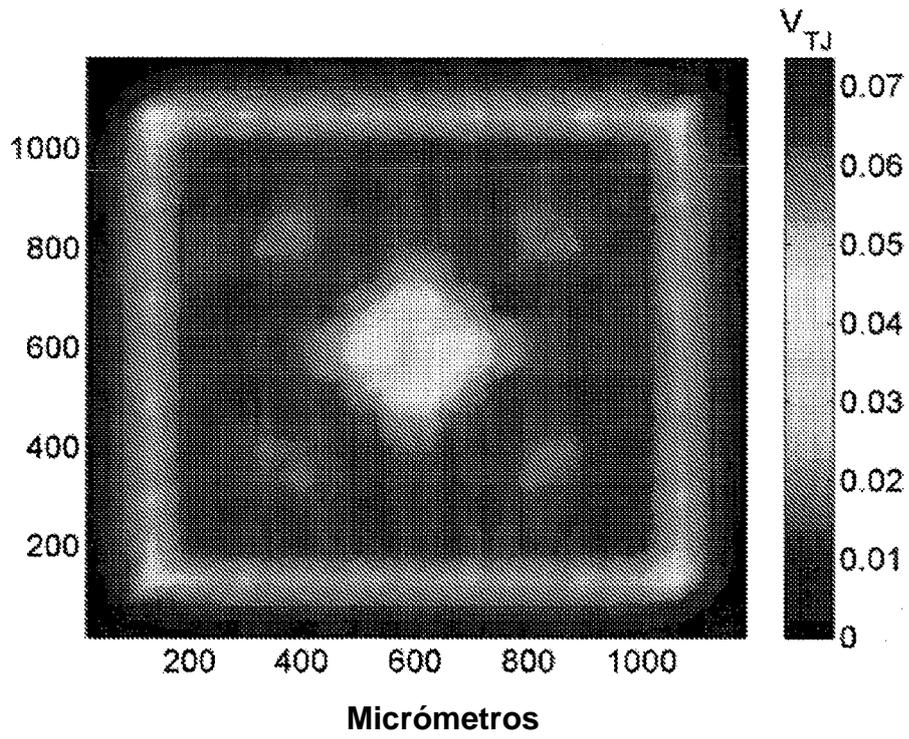


FIG. 11

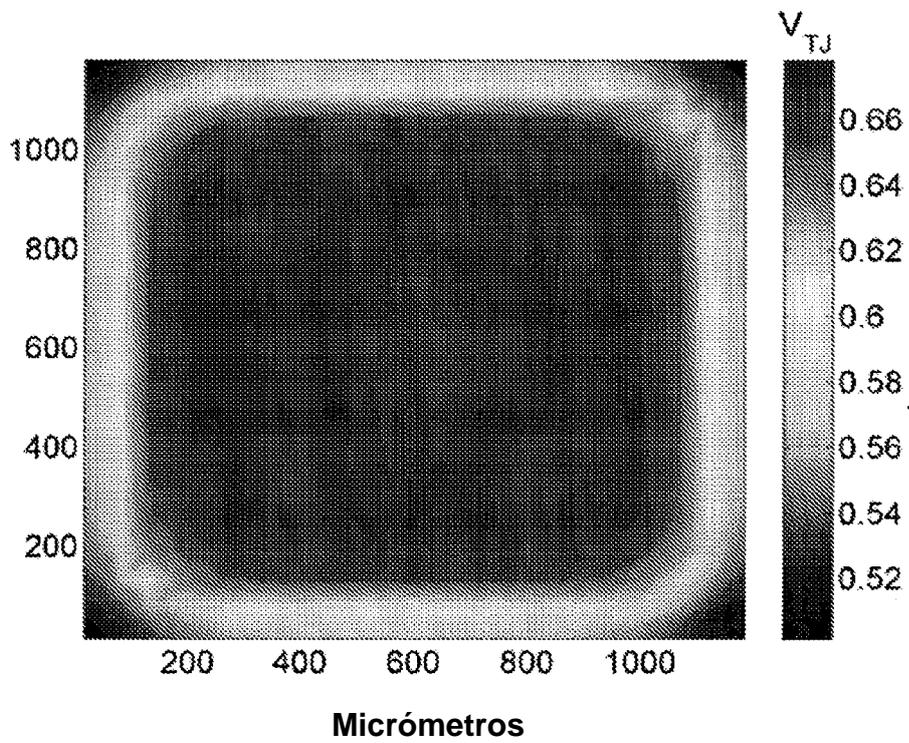


FIG. 12