(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **3 081 498**

(21) Número de solicitud: 202530257

(51) Int. CI.:

H10P 74/20 (2006.01)
H10P 95/00 (2006.01)
H10D 10/01 (2015.01)

(12) SOLICITUD DE PATENTE A1

(22) Fecha de presentación:

27.03.2025

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

14.10.2026

(71) Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE CÁDIZ (100,00%)
PASEO CARLOS III nº 9 Rectorado de la Universidad de Cádiz
11003 CADIZ (Cádiz) ES

(72) Inventor/es:

LOPEZ CALLE, Isabel

(54) Título: **MÉTODO PARA RECUPERAR LA GANANCIA DE UN TRANSISTOR BIPOLAR DAÑADO POR RADIACIÓN IONIZANTE**

(57) Resumen:

Método para recuperar la ganancia de un transistor bipolar dañado por radiación ionizante.

La invención aborda el problema de la degradación de transistores bipolares expuestos a radiación ionizante, un desafío común en entornos como el espacio y la energía nuclear.

El método propuesto restaura la ganancia del transistor mediante la aplicación controlada de corriente de colector, que libera las cargas atrapadas en la interfaz semiconductor-aislante.

Esta invención representa un avance significativo en el campo de la electrónica, ofreciendo una solución práctica y rentable para prolongar la vida útil de los dispositivos electrónicos en condiciones adversas y reduciendo el impacto ambiental asociado a la sustitución constante de componentes.

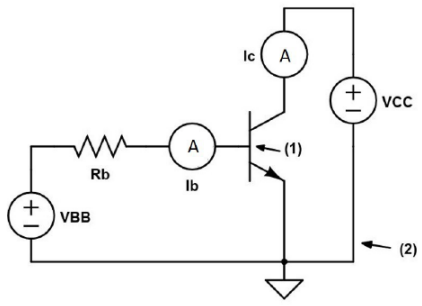


Figura 1

ES 3 081 498 A1

DESCRIPCIÓN

MÉTODO PARA RECUPERAR LA GANANCIA DE UN TRANSISTOR BIPOLAR DAÑADO POR RADIACIÓN IONIZANTE

SECTOR DE LA TÉCNICA

La presente invención se encuadra en el sector de la electrónica, con aplicaciones en diversos campos donde los dispositivos semiconductores están expuestos a radiación ionizante, como el sector espacial, la industria nuclear y la investigación en aceleradores de partículas.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

La degradación de dispositivos semiconductores debido a la exposición a radiación ionizante es un problema recurrente en diversas aplicaciones, especialmente en el sector espacial. La radiación ionizante, como los rayos cósmicos, las partículas y la radiación emitidas por fuentes radiactivas, puede ionizar la materia lo que a su vez provoca un deterioro en sus características eléctricas.

Tradicionalmente, se han empleado diversas técnicas para mitigar los efectos de la radiación, como el blindaje, el uso de materiales tolerantes a la radiación y el diseño de circuitos redundantes. Sin embargo, estas soluciones suelen ser costosas y pueden comprometer el rendimiento del dispositivo. Además, una vez que un dispositivo ha sido dañado por radiación, las opciones de reparación son limitadas.

Dentro de las técnicas existentes para abordar la degradación de transistores bipolares, se encuentra la invención descrita en el documento US7961032B1 (Yang et al.). Esta invención se centra en la reparación de la degradación causada por el efecto de portadores calientes debido a la polarización inversa de la unión emisor-base. El método consiste en aplicar una corriente de reparación a la base del transistor, mientras se polariza directamente la unión emisor-base e inversamente la unión colector-base durante un tiempo específico, determinada por una estimación definida como “cercana” a la máxima corriente de pico que soporta el transistor.

A diferencia de la técnica anterior, la presente invención aborda específicamente la recuperación de la ganancia degradada y se basa en la aplicación controlada de una corriente de colector en el transistor ajustada al grado de daño sufrido por el transistor, lo que permite reducir el estrés sufrido por el transistor en el proceso de recuperación, alargando su vida útil posterior.

EXPLICACIÓN DE LA INVENCIÓN

La presente invención se centra en un nuevo método para recuperar la ganancia de transistores bipolares que han sido dañados por la radiación ionizante. La exposición a la radiación ionizante provoca el atrapamiento de cargas en la interfaz aislante-semiconductor del transistor lo que conduce a una disminución significativa de la ganancia del transistor y, en casos severos, el fallo completo del dispositivo.

Las técnicas convencionales para mitigar los efectos de la radiación, como el blindaje no permiten recuperar dispositivos ya dañados.

La presente invención propone una solución innovadora que consiste en la aplicación controlada de una corriente de colector sobre el transistor afectado. Esta corriente inducida por un campo eléctrico en la región base del transistor, provoca la liberación de las cargas atrapadas en el interfaz semiconductor-aislante. Al liberar estas cargas se restaura la conductividad de las regiones del transistor, lo que permite recuperar su ganancia original.

El método se implementa mediante un circuito de control que genera la corriente de colector. Este circuito incluye tres parámetros fundamentales: VBB, VCC y Rb, siendo:

- VBB: la tensión aplicada a la base del transistor.
- VCC: la tensión aplicada al colector del transistor.
- Rb: la resistencia presente en el circuito de polarización de la malla de base

La selección de estos parámetros es esencial para asegurar que el transistor opere dentro de los límites especificados por el fabricante y se polarice en su zona activa. Así, estos parámetros se deben escoger de tal forma que:

1.- Los valores máximos no superen los límites permitidos en el componente para los parámetros definidos en las especificaciones del fabricante (hoja de datos o “datasheet”).

2.- Los valores mínimos permitan polarizar el transistor en su zona activa donde se cumple la relación Ic = β·Ib, donde Ic es la corriente de colector, Ib es la corriente de base y β es la ganancia en corriente del transistor, normalmente entre [50-200]. Esto se consigue ajustando el valor de la resistencia Rb a las condiciones óptimas para la medida de los valores de corriente especificados por el fabricante.

En configuración activa del transistor se cumplen las ecuaciones:

$VBB=Ib\cdot R_b+Vbe$ siendo Vbe la tensión entre la base y el emisor.

$Ic=\beta\cdot Ib$

Por tanto, $Ic=\beta\cdot(VBB-Vbe)/R_b$ donde $\beta=Ic/Ib$

Así, un aumento en la tensión VBB produce un aumento en la corriente de colector Ic,

La medición de Ib e Ic se realiza mediante amperímetros ubicados en la malla de base y la malla de colector. En el proceso de medida se modifica la tensión de polarización de colector VCC y la tensión de polarización de base VBB, lo que permite calcular el valor β en las condiciones especificadas por el fabricante (VCE, Ic) descritas en su hoja de datos.

VCC=VCE

Ic (VBB) = Ic

La recuperación de β se realiza mediante el mismo sistema de control modificando los valores de polarización VCC y la tensión de polarización de la base VBB hasta alcanzar corriente de recuperación.

VCC=VCEO

Ic (VBB) = Ic_rec

El rango de aplicación de Ic_rec se puede estimar en base a un factor k definido a partir de la diferencia, en valor absoluto, entre el valor de β antes de la irradiación (β_0)

y el valor de β después de la irradiación (β_1), dividido por el valor de β previo a la irradiación (β_0) Esto es, el factor k representa la variación relativa de la ganancia expuesta a radiación respecto a su valor origina antes de la radiación.

Este factor es determinante para extraer el valor de la corriente de colector necesaria para inducir una recuperación de la ganancia.

La corriente de colector de recuperación aplicada cumplirá por tanto la relación $Ic_rec = k \cdot Ic_0$ donde k es el factor de recuperación (equivalente a la degradación relativa de la ganancia) e Ic_0=100mA hace referencia a la corriente característica del proceso de recuperación en relación a la tasa de generación de trampas en la interfaz de la base como consecuencia de la radiación.

Otro aspecto que favorece la eliminación de cargas atrapadas en la base como consecuencia de la irradiación es la polarización colector-emisor durante el proceso de recuperación a la tensión máxima colector-emisor VCEO definida por el fabricante Así, en el proceso de recuperación se ajusta VCC = VCEO

Las principales ventajas de esta técnica incluyen:

- Alta eficiencia: La técnica permite recuperar una proporción significativa de la ganancia perdida en transistores dañados por radiación.
- Rapidez: El proceso de recuperación y medida de la ganancia se realiza mediante el mismo sistema de control y es relativamente rápido, lo que minimiza el tiempo de inactividad del dispositivo.
- Selectividad: La técnica actúa específicamente sobre la degradación producida por la radiación, sin afectar a otras características del transistor.
- Versatilidad: La técnica puede aplicarse a una amplia variedad de transistores bipolares, independientemente del material o del proceso de fabricación.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción de la invención y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo

y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Muestra una vista del transistor (1) y el dispositivo de control o esquema de polarización del transistor (2).

Figura 2.- Presenta un diagrama de estados que describe el procedimiento para recuperar la ganancia del transistor a su valor original.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCIÓN

La presente invención proporciona un método eficaz para recuperar la ganancia de transistores bipolares dañados por radiación ionizante. Como se muestra en la Figura 1, el método consiste en la aplicación controlada de una corriente al colector del transistor.

El transistor bipolar (1) se conecta a un circuito de control (2) que genera la corriente necesaria tanto para su medida como para su recuperación.

En el proceso de medida, la intensidad de corriente Ic (VBB) y la tensión VCC se ajustan de acuerdo a las condiciones especificadas por el fabricante para la medida de la ganancia β. Los valores de VCE e Ic vienen especificados en la hoja de datos del transistor.

VCC=VCE

Ic (VBB) = Ic

En el proceso de recuperación, la intensidad de la corriente aplicada Ic(VBB) se ajusta de acuerdo con el grado de daño sufrido por el transistor y la tensión VCC se iguala la tensión VCEO definida por el fabricante.

VCC=VCEO

Ic (VBB) = Ic_rec

Donde Ic_rec queda definida como

$$Ic_rec = \frac{|\beta_1 - \beta_0|}{\beta_0} x100mA$$

La duración de la aplicación no es un factor crítico, salvo en los casos en donde la corriente de recuperación tenga un valor elevado cercano a la máxima corriente de colector especificada por el fabricante. Una exposición prolongada a un valor de corriente cercano al máximo podría provocar un calentamiento excesivo del componente por efecto Joule, como sucede con cualquier otro dispositivo cuando circula corriente. Por lo tanto, es fundamental asegurar que Ic_rec se mantenga por debajo del valor máximo especificado en la hoja de características del componente y que la duración de la aplicación sea suficiente para detectar un cambio en la ganancia del transistor.

El valor de Ic en recuperación siempre es menor a 100mA lo que asegura poder aplicar la técnica a multitud de transistores cuya corriente de recuperación está muy alejada de la máxima corriente de colector permitida, reduciendo el estrés sufrido por el transistor en su proceso de recuperación y alargando su vida útil posterior.

Esta metodología se puede aplicar de forma completa o por pasos intermedios. La metodología de pasos intermedios permite recuperar la ganancia poco a poco, en vez de recuperar la ganancia de forma total, con lo que se obtiene un control refinado del proceso, de tal forma que la corriente de colector se va aumentando poco a poco en función de su degradación gradual donde todavía se reduce más el estrés sufrido por el transistor al reducir la corriente máxima que se utiliza para la recuperación.

Para aplicar la metodología gradual se deben obtener valores para la ganancia degradada a diferentes dosis de radiación ionizante.

El circuito de control (2) es el mismo para la medida de la ganancia y para la recuperación de la ganancia. El circuito de control incluye los parámetros VBB y VCC, que se seleccionan cuidadosamente en función de si el proceso es el de medida o el de recuperación. El valor de Rb es el mismo en los dos procesos.

Durante todo el procedimiento, se debe asegurar que el transistor opere en configuración activa. Esto se realiza ajustando el valor de la resistencia Rb a las condiciones óptimas para la medida de los valores de corriente.

En configuración activa del transistor se cumplen las ecuaciones:

$VBB=Ib\cdot R_b+Vbe$ siendo Vbe la tensión entre la base y el emisor.

$Ic=\beta\cdot Ib$

Por tanto $Ic=\beta\cdot(VBB-Vbe)/R_b$ donde $\beta=Ic/Ib$

Así, un aumento en la tensión VBB produce un aumento en la corriente de colector hasta que se obtiene el valor Ic especificado en cada procedimiento: medida o recuperación.

El procedimiento de medida de la ganancia sigue los pasos descritos en el diagrama de estados de la Figura 2, y también sirve para medir el valor de β_0 antes de haber sido sometido el transistor a ningún nivel de radiación.

- Conexión: Se conecta el transistor al circuito de control.

- Ajuste de la tensión VCC = VCE, donde VCE es la condición de polarización VCE definida por el fabricante para la medida de la ganancia β

  Note que VCC = VCE dado que no hay presencia de resistencia en la malla de colector en el circuito de control.

- Aplicación de corriente: Se aplica la corriente de colector del transistor Ic (VBB) mediante el ajuste de la tensión VBB hasta conseguir el valor de Ic definida por el fabricante para la condición de polarización VCC=VCE

  En configuración activa del transistor se cumplen las ecuaciones:

  $VBB=Ib\cdot R_b+Vbe$ siendo Vbe la tensión entre la base y el emisor.

  $Ic=\beta\cdot Ib$

  Por tanto $Ic=\beta\cdot(VBB-Vbe)/R_b$ donde $\beta=Ic/Ib$

  Así, un aumento en la tensión VBB produce un aumento en la corriente de colector hasta que se obtiene el valor **Ic** especificado por el fabricante para realizar la medida de β.

- Medición: Se miden la corriente de base Ib y la corriente de colector Ic mediante amperímetros.

- Cálculo de la ganancia: Se calcula la ganancia β=Ic/Ib del transistor

- Comparación de la ganancia con su valor original

El procedimiento para la recuperación de la ganancia sigue los pasos descritos en el diagrama de estados de la Figura 2 una vez el transistor ha sido sometido a un nivel de radiación:

- Ajuste de la tensión VCC = VCEO, donde VCEO es la máxima tensión aplicada entre aplicada entre colector y emisor permitida por el fabricante.

- Aplicación de corriente: Se aplica una corriente al colector del transistor Ic(VBB) mediante el ajuste de la tensión VBB hasta conseguir el valor de la corriente de recuperación de colector Ic_rec definido como

$$Ic_rec = \frac{|\beta_1 - \beta_0|}{\beta_0} x100mA$$

- Medida de la ganancia: Se repite la medición de Ib e Ic para el cálculo de la ganancia del transistor β_1 y su comparación con su valor original β_0.

- Repetición: este proceso se repite hasta que se alcanza el valor deseado de ganancia.

Esta técnica puede implementarse en forma gradual. La elección entre estas modalidades dependerá de los requerimientos específicos de la aplicación y de los valores máximos de corriente y tensión permitidos por el transistor.

La invención encuentra aplicación en diversos sectores donde los dispositivos electrónicos están expuestos a radiación ionizante, como la industria espacial, la nuclear y la médica. En general es de aplicación para prolongar la vida en equipos electrónicos utilizados en entornos hostiles.

REIVINDICACIONES

1. Un método para recuperar la ganancia de un transistor bipolar dañado por radiación ionizante, caracterizado por comprender las siguientes etapas:

- Conexión: Conectar el transistor bipolar dañado a un circuito de control.
- Ajuste: Ajustar la tensión aplicada VCC = VCE donde VCE es la tensión especificada por el fabricante del transistor para la medida de la ganancia
- Aplicación de corriente de colector: Aplicar la corriente de colector del transistor Ic (VBB) mediante el ajuste de la tensión VBB hasta conseguir el valor de Ic definida por el fabricante para la condición de polarización VCC=VCE.
- Medición: Medir la corriente de base (Ib) y la corriente de colector (Ic) del transistor.
- Cálculo de la ganancia: Calcular la ganancia (β) del transistor a partir de las mediciones de Ib e Ic.
- Comparación de la Ganancia: Comparar la ganancia calculada con el valor de ganancia original (β0) del transistor medido antes de la exposición a la radiación.
- Ajuste de la tensión: Ajustar la tensión VCC = VCEO, donde VCEO es la máxima tensión aplicada entre aplicada entre colector y emisor permitida por el fabricante
- Aplicación de corriente de colector de recuperación: Aplicar una corriente de colector de recuperación (Ic_rec) al transistor mediante el ajuste de la tensión aplicada a la base (VBB).
- Repetir las etapas de medición, cálculo, comparación de la ganancia, ajuste de la tensión y aplicación de corriente de colector de recuperación, hasta que la ganancia (β) del transistor alcance su valor original (β0).

2. El método según la reivindicación 1, en el que la corriente de colector de recuperación (Ic_rec) se determina mediante la relación: $Ic_rec = (|\beta 1 - \beta 0| / \beta 0) \cdot Ic0$, donde:

- β0 es la ganancia del transistor antes de la irradiación,
- β1 es la ganancia del transistor después de la irradiación,
- Ic0 es una corriente de referencia cuyo valor se establece en 100mA.

3. El método según las reivindicaciones 1 o 2, en el que el circuito de control comprende parámetros de polarización que aseguran que el transistor opere en configuración activa durante el proceso de recuperación.

4. El método según la reivindicación 3, en el que los parámetros de polarización incluyen la tensión aplicada a la base (VBB), la tensión aplicada al colector (VCC) y una resistencia (Rb) en el circuito de polarización de la malla de base, manteniendo el valor de dicha resistencia constante tanto para la medición de la ganancia como para la aplicación de la corriente de recuperación.

5. El método según la reivindicación 1, caracterizado por aplicarse de forma gradual, comprendiendo las etapas de:

- Determinar la ganancia degradada del transistor a diferentes dosis de radiación ionizante.
- Para cada nivel de degradación, aplicar una corriente de colector de recuperación (Ic_rec) ajustada proporcionalmente al grado de daño según la relación de la reivindicación 2.
- Realizar las etapas de medición, cálculo y comparación de la ganancia después de cada aplicación de corriente de colector de recuperación hasta alcanzar la ganancia original.

6. El método según la reivindicación 1, en el que la aplicación de la máxima tensión colector-emisor VCEO induce un campo eléctrico mayor en la región base del transistor, que favorece la liberación de cargas atrapadas en la interfaz semiconductor-aislante.

7. Un dispositivo para recuperar la ganancia de un transistor bipolar dañado por radiación ionizante, caracterizado por comprender:

- Un circuito de control configurado para conectar un transistor bipolar dañado.
- Medios para ajustar la tensión aplicada entre colector y emisor (VCC) a la tensión máxima colector-emisor (VCEO) especificada por el fabricante del transistor durante la recuperación.
- Medios para generar y aplicar una corriente de colector de recuperación (Ic_rec) al transistor mediante el ajuste de la tensión aplicada a la base (VBB).
- Medios para determinar el valor de la corriente de colector de recuperación

(Ic_rec) según la relación: Ic_rec = (|β1 − β0| / β0) · Ic0, donde Ic0 es una corriente de referencia de 100mA.

- Medios para medir la corriente de base (Ib) y la corriente de colector (Ic) del transistor.
- Medios para calcular la ganancia (β) del transistor a partir de las mediciones de Ib e Ic.
- Medios para comparar la ganancia calculada con el valor de ganancia original (β0) del transistor.
- Medios para repetir la aplicación de la corriente de recuperación y las mediciones hasta que la ganancia (β) del transistor alcance su valor original (β0).

8. El dispositivo según la reivindicación 7, en el que el circuito de control está configurado para polarizar el transistor en configuración activa tanto para el proceso de medida como para el proceso de recuperación.

9. El dispositivo según la reivindicación 8, en el que el circuito de control incluye parámetros de polarización ajustables, comprendiendo la tensión aplicada a la base (VBB), la tensión aplicada al colector (VCC) y una resistencia (Rb) en el circuito de polarización de la malla de base, manteniendo el valor de dicha resistencia fijo tanto para la medición de la ganancia como para la aplicación de la corriente de recuperación.

10. El dispositivo según la reivindicación 7, caracterizado por implementar la recuperación de forma gradual, comprendiendo medios para:

- Determinar la ganancia degradada del transistor a diferentes dosis de radiación ionizante.
- Para cada nivel de degradación, aplicar una corriente de colector de recuperación (Ic_rec) ajustada proporcionalmente al grado de daño según la relación definida en la reivindicación 7.
- Realizar las etapas de medición, cálculo y comparación de la ganancia después de cada aplicación de corriente de colector de recuperación hasta alcanzar la ganancia original.

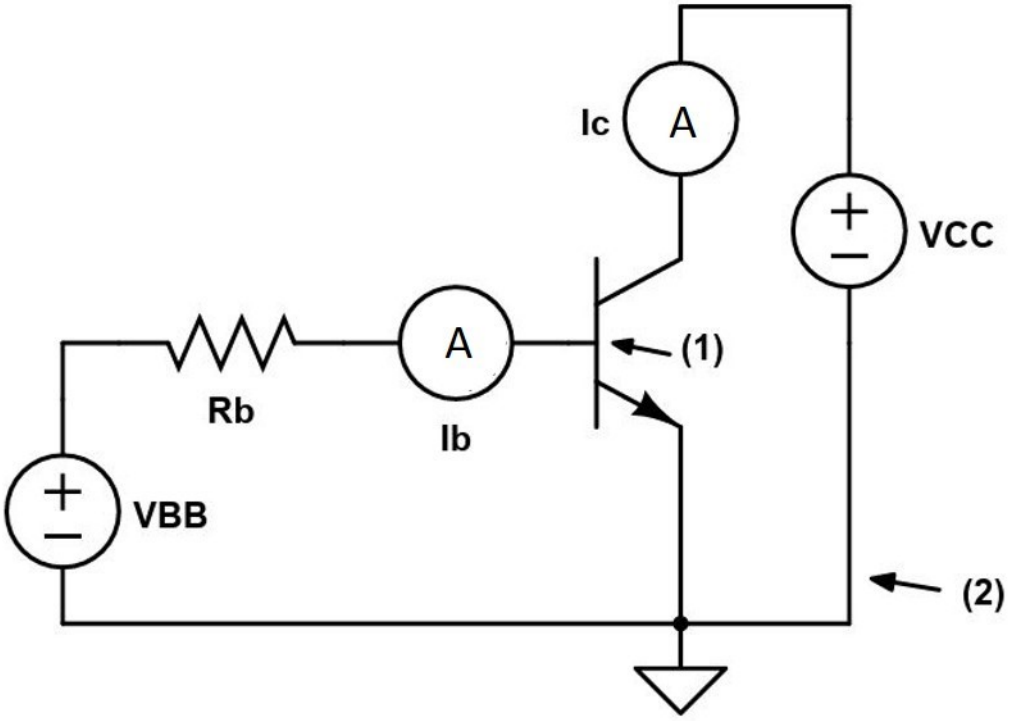


Figura 1

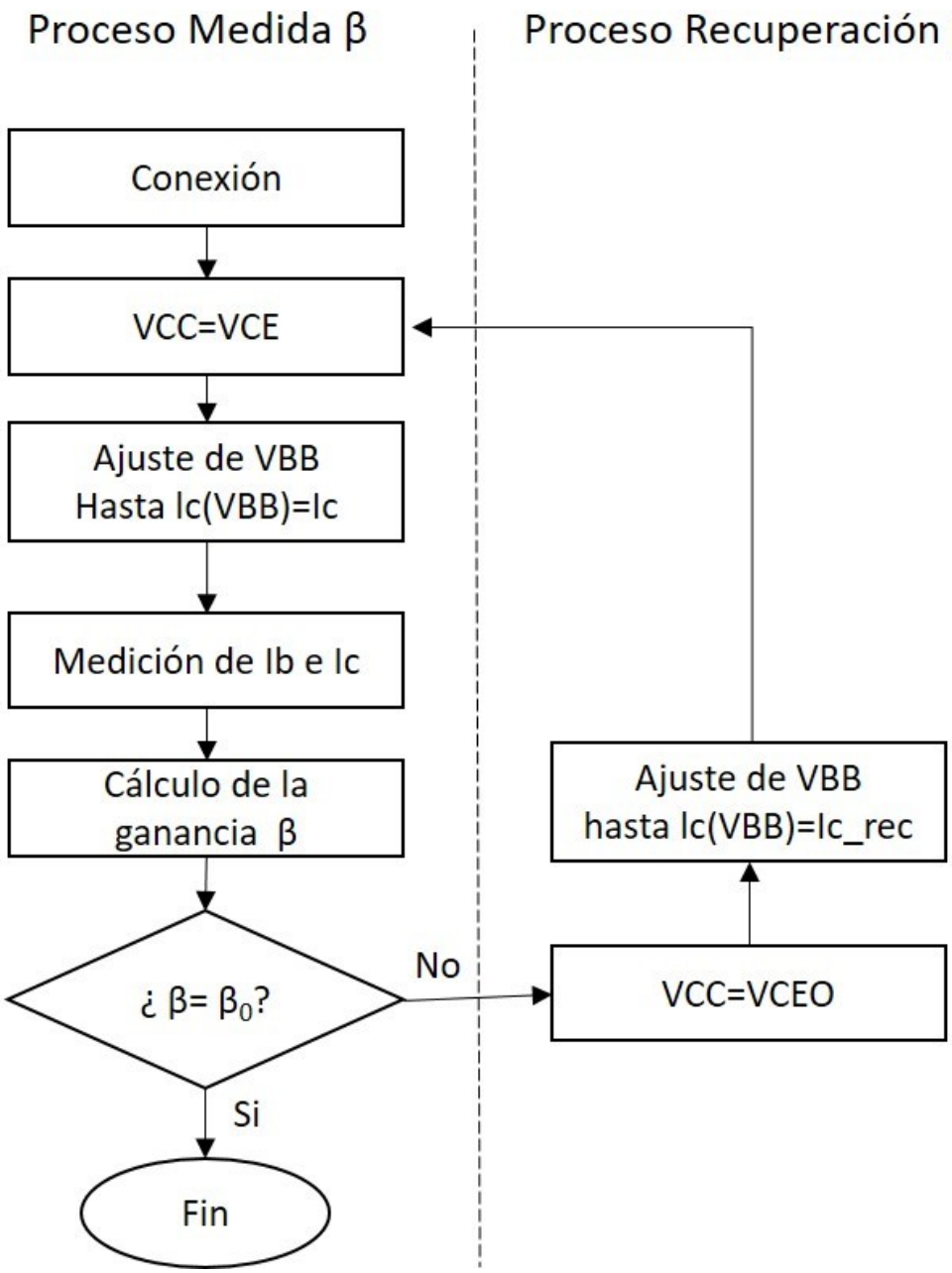

Proceso Medida β
Proceso Recuperación β
Conexión
VCC=VCE
Ajuste de VBB
Hasta Ic(VBB)=Ic
Medición de Ib e Ic
Cálculo de la
ganancia β
¿ β= β0?
No
Si
Fin
Ajuste de VBB
hasta Ic(VBB)=Ic_rec
VCC=VCEO

Figura 2

OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(21) N.º solicitud: 202530257

(22) Fecha de presentación de la solicitud: 27.03.2025

(32) Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

(51) Int. CI.: Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	(56) Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	US 7961032 B1 (YANG ZHIJIAN et al.) 14/06/2011, resumen; columnas 5 a 8; figuras 5, 9 y 11; reivindicaciones 1 y 18.	1 - 10
A	US 2006118912 A1 (GUARIN, FERNANDO et al.) 08/06/2006, resumen; figura 2 y 3.	1 - 10
A	HUANG C.-J. et al.: "Temperature dependence and post-stress recovery of hot electron degradation effects in bipolar transistors". Bipolar Circuits and Technology Meeting, 1991, Proceedings of the 1991 Minneapolis, MN, USA 9-10 Sept. 1991, New York, NY, USA, IEEE, US. Jopke J V, 09/09/1991, páginas 170-173 [en línea] [recuperado el 18/20/2026], ISSN ISBN 0-7803-0103-X. Resumen.	1 - 10
A	INGVARSON, F. et al.: "Recovery and stress dynamics in bipolar transistors and MOS devices". Microelectronics Reliability, 01/06/1998, Vol. 38, Nº 6 - 8, páginas 1109-1113 [en línea] [recuperado el 18/02/2026], ISSN 0026-2714, <DOI: 10.1016/S0026-2714(98)00088-2>. Todo el documento.	1 - 10
A	US 2009190413 A1 (HSU, LOUIS L. C. et al.) 30/07/2009, figura 4 y 10.	1 - 10
A	CHENG PENG et al.: "Understanding Radiation and Hot Carrier-Induced Damage Processes in SiGe HBTs Using Mixed-Mode Electrical Stress". IEEE Transactions on Nuclear Science. 2007, 01/12/2007, Vol. 54, Nº 6, páginas 1938-1945 [en línea] [recuperado el 28/02/2026], ISSN 0018-9499, <DOI: 10.1109/TNS.2007.909985>. Resumen.	1 - 10

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica
O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones ☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe	Examinador	Página
18.02.2026	M. Ortega González	1/2

CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

H10P74/20 (2026.01)
H10P95/00 (2026.01)
H10D10/01 (2025.01)

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

H10P, H10D

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

AbS colección patentes, AbS colección literatura no patente, INVENES/LATIPAT, WPI, Internet