

(12)

SOLICITUD de PATENTE

(43) Fecha de publicación: **12/12/2005** (51) Int. Cl.?: **G01K 07/01**
 (22) Fecha de presentación: **27/07/2005**
 (21) Número de solicitud: **PA05007947**

(71) Solicitante:
**CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS
 AVANZADOS DEL I. P. N.
 Av. Instituto Politécnico Nacional Numero
 2508 07360 Distrito Federal MX**

(72) Inventor(es):
**Jaime Mimila Arroyo
 Av. Instituto Politécnico Nacional, Numero
 2508 Distrito Federal 07360 MX**

(74) Representante:
**MARTHA FIGUEROA PEREZ
 Av. Instituto Politécnico Nacional, Numero 2508,
 Ofic.Subdireccion de Asuntos Juridicos, Edif.
 Direccion-Administracion, 3Y Piso Distrito
 Federal 07360 MX**

(54) Título: **METODO PARA UTILIZAR UN TRANSISTOR BIPOLAR COMO SENSOR DE TEMPERATURA Y/O
 TERMOMETRO AUTOCALIBRADO.**
 (54) Title: **METHOD FOR USING A BIPOLAR TRANSISTOR AS A TEMPERATURE SENSOR AND/OR A SELF-
 CALIBRATED THERMOMETER.**

(57) Resumen

Esta invencion proporciona un metodo para utilizar un transistor bipolar como sensor de temperatura y/o un termometro autocalibrado, inmune a errores por elementos parasitos como resistencias o factores de idealidad y a su evolucion. En este metodo los valores de corriente de colector, ICmi en funcion del voltaje directo, VEBmi emisor-base, son graficados en la forma del producto $ICmi(VEBmi) \times \exp(-qVEBmi/kT0)$, en funcion del voltaje emisor-base VEB. T0 es un parametro conducente a que una region de esta grafica tenga pendiente cero, siendo a la vez la temperatura absoluta del transistor al momento de obtener la corriente de colector ICmi en funcion del voltaje, VEBmi.

(57) Abstract

Described is a method for using a bipolar transistor as a temperature sensor and/or self-calibrated thermometer, which is protected against errors caused by parasite elements such as resistances due to ideal factors and the evolution thereof. In this method the collector current values, ICmi according to the direct voltage, and VEBmi emitter-base, are plotted in the ICmi product form $(VEBmi) \times \exp(-qVEBmi/kT0)$ according to the VEB emitter-base voltage. T0 is a parameter determining that a region of the graphic has a zero gradient of zero, thus simultaneously being the absolute temperature of the transistor at the moment of obtaining the collector current ICmi according to the VEBmi voltage.

MÉTODO PARA UTILIZAR UN TRANSISTOR BIPOLAR COMO SENSOR DE TEMPERATURA Y/O TERMÓMETRO AUTOCALIBRADO.

Campo de la invención.

5

La presente invención establece el uso de transistores bipolares como sensores de temperatura y/o termómetros autocalibrados, y más específicamente establece un método para utilizar un transistor bipolar como un preciso sensor de temperatura y/o termómetro auto calibrado.

10

Antecedentes de la invención.

Una característica plenamente establecida de los materiales llamados semiconductores es la dependencia con la temperatura absoluta a la cual se encuentran de algunas de sus propiedades físicas. Lo anterior es particularmente
15 válido para los dispositivos electrónicos y/o circuitos electrónicos de todo tipo; discretos, integrados o híbridos que incluyan al menos una unión p-n. Donde por unión pn se entiende una estructura construida a base de materiales semiconductores constituida por dos regiones de materiales semiconductores una
20 de conductividad tipo P y la otra de conductividad N en contacto una con la otra más sus accesos eléctricos correspondientes. Esto es válido independientemente de que la mencionada unión pn sea obtenida mediante impurificación metalúrgica o inducida, y de la aplicación inicial de tal unión pn, tal como: rectificadores, fotodiodos, diodos emisores de luz coherente o incoherente (de cualquier longitud
25 de onda), celdas solares, transistores bipolares, SRCs, etc. De esta manera, en general en los dispositivos electrónicos a base de materiales semiconductores incluyan o no una unión p-n, sus características físicas de desempeño son intrínsecamente dependientes de la temperatura absoluta a la cual el correspondiente dispositivo electrónico está siendo operado. Gracias a esta
30 propiedad, dispositivos semiconductores discretos o integrados son amplia y extensivamente usados como sensores de temperatura y/o, cuando calibrados,

como termómetros. Específicamente, la unión p-n o diodo, es ampliamente usada como termómetro, para lo cual requiere ser calibrada periódicamente.

5 La corriente $I(V)$, que fluye a través de una unión p-n o diodo, en función de la polarización directa, V , aplicada a esa unión p-n o diodo y para valores del voltaje aplicado mayores que $3kT$, está dada por una ecuación del tipo

$$I(V) = I_{DS}(T) \times \exp[q(V - IR_S)/\eta_D kT] + I_{SR}(T) \times \exp[q(V - IR_S)/\eta_r kT] + R_P/(V - IR_S)$$

10 (1)

Donde $I_{DS}(T)$ es un término pre-exponencial llamado corriente de saturación por difusión del diodo, la cual es una función de la temperatura absoluta; T , a la cual está operando el diodo; q , es la carga del electrón; R_S , es la resistencia parásita en serie del diodo; η_D , es el factor de idealidad para el mecanismo de conducción de corriente, debido a la difusión de portadores minoritarios; k , es la constante de Boltzmann; $I_{SR}(T)$, es otro factor pre-exponencial llamado corriente de saturación por recombinación del diodo, el cual es también dependiente de la temperatura absoluta T a la cual esta operando el diodo; η_r , es el factor de idealidad para la corriente debida al mecanismo de recombinación de minoritarios en la llamada región de carga espacial del diodo; y R_P , es la resistencia parásita en paralelo del diodo. En la ecuación (1) el primer término del lado derecho se debe a la difusión térmica de portadores minoritarios en las regiones neutras de la unión p-n, que han sido inyectados desde la región contraria por efecto de la polarización directa. En la misma ecuación (1), el segundo término del lado derecho es debido a la recombinación de ambos tipos de portadores minoritarios, es decir, electrones y huecos en la llamada región de carga espacial de la unión p-n y, el tercer elemento en el lado derecho de esa misma ecuación (1) es debido a la resistencia parásita en paralelo, el término $(V - IR_S)$ representa la parte del voltaje externo aplicado V , que esta efectivamente polarizando a la unión p-n. Finalmente, IR_S es la fracción del voltaje aplicado externamente al diodo, que cae a través de la resistencia parásita

15

20

25

30

en serie, más las resistencias parásitas ocasionadas por las conexiones eléctricas necesarias a la polarización y medición eléctrica.

Normalmente cuando se usa la unión p-n como sensor de temperatura, se opera en una región de polarización directa donde, el primer término de la ecuación (1) es dominante, es decir, cuando los términos restantes pueden ser despreciados. Bajo tales condiciones de operación y cuando circula por la unión p-n una corriente directa constante; I_0 , el voltaje directo aplicado externamente para mantener esa corriente constante, varía con la temperatura de acuerdo con la ecuación (2), abajo

10

$$V(I_0, T) = (\eta_D kT/q) \times \ln(I_0 / I_{DS}(T)) + I_0 R_s \quad (2)$$

15

20

25

En general, tanto I_{DS} como I_{SR} dependen del diseño de la unión p-n y de la tecnología de proceso que se utilizó en su manufactura; R_s y R_p dependen adicionalmente de la tecnología de manufactura, y η_D y η_r deberían ser iguales, conforme al modelo de Shockley para el transporte de carga a través de la unión p-n, a 1 y 2 respectivamente. Sin embargo, tanto η_D como η_r solo excepcionalmente resultan tener los valores previstos por el modelo de Shockley y hasta ahora no hay un modelo capaz de predecir su valor experimental real. Aún peor, η_D y η_r raramente tienen el mismo valor para diodos localizados en sitios diferentes en la misma oblea. Cada uno de los parámetros de transporte de carga de la unión p-n descritos antes, introducen errores en la medición de temperatura, haciendo necesaria una calibración individual de las uniones p-n que son usadas como termómetros. A pesar de tales inconvenientes, los sensores de temperatura y termómetros de unión p-n son ampliamente utilizados en incontables aplicaciones.

30

Con el propósito de reducir algunos de los problemas antes mencionados, que constituyen fuentes de error en sensores de temperatura y termómetros basados en uniones p-n, se han hecho diversas proposiciones. Por ejemplo, Thomson D. (et al.), en su patente Americana número 6,554,469, propone intentando reducir el efecto de la resistencia parásita en serie en el valor de la temperatura medida, un

método en donde usa la unión emisor base de un transistor bipolar, en el que mide cuatro corrientes a través de esta unión seguido de elaborados cálculos en los que hacen intervenir el valor de la ganancia de corriente del transistor. Sin embargo desprecian otros parámetros de la unión p-n que pueden introducir errores, tales como los valores de los factores de idealidad así como variaciones en éste como resultado del uso del termómetro. Tales inconvenientes están completamente ausentes en nuestro método.

Con el propósito similar, Matsuno Y. (et. al.), en su patente Americana de numero 6,255,891 propone el uso de dos transistores bipolares de áreas activas diferentes, como parte de un circuito incluyendo comparadores y voltajes de referencia, totalmente innecesarios en nuestro método.

Breve descripción de las figuras.

15

Figura 1.- Gráfica de la corriente de colector, I_C (reportada en el eje de las ordenadas) de un transistor bipolar comercial de Germanio (Ge), en función del voltaje de polarización directa, V_{EB} (reportados en el eje de las abscisas) entre emisor-base, en equilibrio térmico con un cuerpo cuya temperatura será medida. La ganancia de corriente del transistor a temperatura ambiente es de 199.

Figura 2.- Gráfica de los valores del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ (reportada en el eje de las ordenadas), utilizando las parejas de valores (V_{EBmi} , I_{Cmi}) mostrados en la FIG.1, en función del voltaje de polarización directa, V_{EB} entre emisor-base (reportados en el eje de las abscisas). Parejas de valores obtenidas cuando el transistor bipolar de germanio se encontraba en equilibrio térmico con el cuerpo cuya temperatura se desea medir. El producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ se ha realizado y graficado para tres valores diferentes de la temperatura absoluta; T_a , que debe proponerse en la ecuación (5). Los valores utilizados son; T; 238.2 K, curva marcada con (A) en la figura, 240.7 K, curva marcada con (B) en la misma figura y 243.2 K, curva marcada con (C) en la figura. Las líneas discontinuas a través de los puntos experimentales de las gráficas son únicamente para guiar la

vista. Obsérvese que únicamente la gráfica del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ obtenida con $T_a = 240.7$ K resulta paralela al eje V_{EB} , para los otros dos valores de temperatura propuestos, la porción de la curva que es recta, resulta con una pendiente diferente de cero.

5

Figura 3.- Gráficas de la corriente de colector, I_C (reportada en el eje de las ordenadas) de un transistor comercial de Silicio (Si), en función del voltaje de polarización directa, V_{EB} (reportados en el eje de las abscisas) entre emisor-base, para dos temperaturas diferentes de operación del transistor usado como termómetro; 118.74K, curva marcada con (A) en la figura y 279.07 K curva marcada con (B) en la figura. La ganancia de corriente del transistor a temperatura ambiente es de 210.

Figura 4.- Gráfica de los valores del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ (reportada en el eje de las ordenadas), utilizando las parejas de valores (V_{EBmi} , I_{Cmi}) mostrados en la Figura 2 curva marcada (A), en función del voltaje de polarización directa, V_{EB} entre emisor-base (reportados en el eje de las abscisas), parejas de valores obtenidas cuando el transistor bipolar de silicio se encontraba en equilibrio térmico con el cuerpo cuya temperatura se desea medir. Para esta primera temperatura a determinar, el producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ se ha realizado y graficado para tres valores diferentes de la temperatura absoluta; T_a que debe proponerse en la ecuación (5). Los valores utilizados son; T; 117.18 K, curva marcada con (A) en la figura, 118.74 K, curva marcada con (B) en la misma figura y 119.23 K, curva marcada con (C) en la figura. Las líneas discontinuas a través de los puntos experimentales de las gráficas son únicamente para guiar la vista. Obsérvese que únicamente la gráfica del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ obtenida con $T_a = 118.74$ K resulta paralela al eje V_{EB} , para los otros dos valores de temperatura propuestos, la porción de la curva que es recta, resulta con una pendiente diferente de cero.

Figura 5.- Gráfica de los valores del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ (reportada en el eje de las ordenadas), utilizando las parejas de valores (V_{EBmi} , I_{Cmi}) mostrados en la Figura 2 curva marcada (B), en función del voltaje de polarización directa, V_{EB}

entre emisor-base (reportados en el eje de las abscisas), parejas de valores obtenidas cuando el transistor bipolar de silicio se encontraba en equilibrio térmico con el cuerpo cuya temperatura se desea medir. Para esta segunda temperatura a determinar, el producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ se ha realizado y graficado para tres valores diferentes de la temperatura absoluta; T_a que debe proponerse en la ecuación (5). Los valores utilizados son; T ; 280.55 K, curva marcada con (A) en la figura, 279.07 K, curva marcada con (B) en la misma figura y 278.2 K, curva marcada con (C) en la figura. Las líneas discontinuas a través de los puntos experimentales de las gráficas son únicamente para guiar la vista. Obsérvese que únicamente la gráfica obtenida con $T_a = 279.07$ K resulta paralela al eje V_{EB} , para los otros dos valores de temperatura propuestos, la porción de la curva que es recta, resulta con una pendiente diferente de cero.

Figura 6.- Gráfica de la corriente de colector, I_C (reportada en el eje de las ordenadas) de un transistor comercial a heterounión NPN de GaInP/GaAs, en función del voltaje de polarización directa, V_{EB} (reportados en el eje de las abscisas) entre emisor-base. La ganancia de corriente del transistor a temperatura ambiente es de 120.

Figura 7.- Gráfica de los valores del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ (reportada en el eje de las ordenadas), utilizando las parejas de valores (V_{EBmi} , I_{Cmi}) mostrados en la Figura 6, en función del voltaje de polarización directa, V_{EB} entre emisor-base (reportados en el eje de las abscisas), parejas de valores obtenidas cuando el transistor bipolar de GaInP/GaAs se encontraba en equilibrio térmico con el cuerpo cuya temperatura se desea medir. Para esta temperatura a determinar, el producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ se ha realizado y graficado para tres valores diferentes de la temperatura absoluta; T_a que debe proponerse en la ecuación (5). Los valores utilizados son; T ; 408.5 K, curva marcada con (A) en la figura, 413.6 K, curva marcada con (B) en la misma figura y 415.8 K, curva marcada con (C) en la figura. Las líneas discontinuas a través de los puntos experimentales de las gráficas son únicamente para guiar la vista. Obsérvese que únicamente la gráfica del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ obtenida con $T_a = 413.6$ K resulta paralela al eje V_{EB} , para los

otros dos valores de temperatura propuestos, la porción de la curva que es recta, resulta con una pendiente diferente de cero.

Figura 8.- Para el caso en el que el transistor se ha degradado perdiendo su capacidad de amplificar señales eléctricas, al poseer una ganancia de corriente menor a la unidad, esta figura muestra la gráfica de la corriente de colector, I_C (reportada en el eje de las ordenadas) de tal transistor comercial en función del voltaje de polarización directa, V_{EB} (reportados en el eje de las abscisas) entre emisor-base, la ganancia de corriente del transistor a temperatura ambiente es de 0.98.

Figura 9.- Gráfica de los valores del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ (reportada en el eje de las ordenadas), utilizando las parejas de valores (V_{EBmi} , I_{Cmi}) mostrados en la Figura 8, en función del voltaje de polarización directa, V_{EB} entre emisor-base (reportados en el eje de las abscisas), parejas de valores obtenidas cuando el transistor bipolar degradado se encontraba en equilibrio térmico con el cuerpo cuya temperatura se desea medir. Para esta temperatura a determinar, el producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ se ha realizado y graficado para tres valores diferentes de la temperatura absoluta; T_a que debe proponerse en la ecuación (5). Los valores utilizados son; T ; 392.9 K, curva marcada con (A) en la figura, 393.9 K, curva marcada con (B) en la misma figura y 394.9 K, curva marcada con (C) en la figura. Las líneas discontinuas a través de los puntos experimentales de las gráficas son únicamente para guiar la vista. Obsérvese que únicamente la gráfica del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ obtenida con $T_a = 393.9$ K resulta paralela al eje V_{EB} , para los otros dos valores de temperatura propuestos, la porción de la curva que es recta, resulta con una pendiente diferente de cero.

Figura 10.- Gráfica de la ganancia de corriente (reportada en el eje de las ordenadas) en función del voltaje de polarización directa entre emisor-base (reportados en el eje de las abscisas) del transistor bipolar con ganancia de corriente a temperatura ambiente menor a la unidad usado para obtener las gráficas de las figuras 8 y 9.

Objetivos de la invención.

La presente invención trata de un método para utilizar un transistor bipolar como un preciso sensor de temperatura y/o termómetro autocalibrado. El método que aquí se describe es independiente, en general, de la estructura y de la ganancia de corriente del transistor bipolar usado como detector de temperatura o termómetro. El mencionado transistor bipolar que será usado como sensor de temperatura y/o termómetro autocalibrado puede ser de cualquier tipo: NPN o PNP, así como ser un transistor a homo-unión o a hetero-unión en cualquiera de sus uniones; emisor-base o base-colector, puede estar hecho de cualesquiera materiales semiconductores elementales o de cualesquiera aleaciones semiconductoras de cualquier composición para constituir cualquiera de las regiones activas o pasivas del transistor; emisor, base, colector o películas de contacto eléctrico. En el transistor bipolar usado como sensor de temperatura y/o termómetro pueden sus diferentes regiones, tanto activas como pasivas, ser monocristalinas, policristalinas, amorfas o combinaciones de ellas. El transistor bipolar usado como sensor de temperatura y/o termómetro, puede tener cualquier valor de ganancia de corriente, y aun valores de ganancia de corriente menores a la unidad. El método propuesto es tal que ni los elementos parásitos tales como resistencias en serie, de emisor, base y colector, ni resistencias parásitas en paralelo, introducen errores importantes en la temperatura que debe ser censada o medida y es por ello inmune a su evolución en curso de uso. Gracias a esta propiedad, el método es particularmente útil cuando se monitorean altas temperaturas o se monitorean temperaturas en ambientes agresivos que pueden inducir cambios en las propiedades físicas de las uniones p-n del transistor bipolar en uso. La determinación del valor de la temperatura a la cual esta operando el transistor bipolar y/o la de su entorno térmico, con el cual el mencionado transistor bipolar debe estar en equilibrio térmico, se efectúa de acuerdo a los siguientes pasos: se obtiene un conjunto de valores de la corriente de colector, $I_{Ci}(V_{EBi})$, en función de un igual número de valores para el voltaje de polarización directa de la unión emisor-base, V_{BEi} , para un valor adecuado del voltaje base-colector. A continuación se hace una gráfica del producto $I_{Ci}(V_{EBi}) \times \exp(-qV_{EBi}/kT_0)$, en función de V_{EBi} , donde

T_0 es el único valor para la temperatura absoluta para el cual la gráfica antes mencionada presenta una región recta con valor de pendiente igual a cero, es decir que resulta paralela al eje coordenado V_{EB} . T_0 es el valor de la temperatura absoluta a la cual se encuentra el transistor bipolar o el medio con el cual se encuentra en equilibrio térmico. Para obtener la temperatura en grados centígrados únicamente se debe adicionar a la temperatura absoluta obtenida, la cantidad 273.15, y para obtener el valor en Fahrenheit hacer la transformación usando la regla correspondiente.

10 Descripción detallada de la invención.

El método para utilizar un transistor bipolar en un sensor de temperatura y/o termómetro auto calibrado se basa en el hecho de que en un transistor bipolar operado a la temperatura absoluta T_m , la corriente de colector medida experimentalmente $I_{Cm}(V_{EBm})$ en función del voltaje de polarización directa V_{EB} , para un voltaje de polarización inversa entre base-colector adecuado, es una función del voltaje de polarización directa entre emisor-base, V_{EB} , que sigue una ecuación del tipo

$$20 \quad I_{Ci}(V_{EBi}) = I_{DS}(T_m) \times \exp[q(V_{EBi} - R_s I) / kT_m] + R_p / (V_{EBi} - I_{Ci} R_s) \quad (3)$$

donde (i) representa el i -ésimo valor del voltaje de polarización directa aplicado a la unión de emisor-base del mencionado transistor, que genera la i -ésima corriente de colector. T_m representa el valor de la temperatura absoluta a la cual se encuentra el transistor bipolar al momento de hacer la medición que permite obtener los valores de corriente de colector en función del voltaje de polarización directa aplicado a la unión emisor-base, los términos restantes han sido definidos antes. En la ecuación (3) no aparece el término debido a la recombinación de portadores minoritarios en la región de carga del espacio de la unión p-n, que si aparece en la ecuación (1). Esto debido a que en esta condición de operación del transistor, se tiene que a través de la unión base-colector únicamente circula la corriente debida a la difusión de portadores minoritarios inyectados en la unión

emisor–base que por difusión alcanzan la unión base-colector. Por ello, el factor de idealidad toma, en este caso, el valor de uno. De esta manera, se elimina el problema del factor de idealidad de la unión de emisor-base, presente en los termómetros actuales.

5

Así, en este método para medir la temperatura de un medio cualquiera se procede de la siguiente manera:

10

1.-Poner el transistor bipolar que medirá la temperatura en contacto térmico adecuado con el medio cuya temperatura se desea medir.

15

2.-Obtener, para el mencionado transistor bipolar usado como sensor de temperatura o termómetro autocalibrado, un conjunto de parejas de valores; (V_{EBmi} , I_{Cmi}). Es decir, que cada pareja de datos debe estar constituida por: el voltaje aplicado entre las terminales emisor-base, polarizándola en directo; V_{EBi} , y la correspondiente corriente eléctrica circulando por el colector, I_{Ci} , manteniendo la unión base-colector sin polarización alguna o en polarización inversa, al mismo tiempo que se mide la corriente eléctrica que circula por esta unión. Donde (i) representa el i -ésimo valor del voltaje de polarización directa aplicado entre las terminales de emisor y base del mencionado transistor, que genera, a su vez, la i -ésima corriente de colector.

20

25

3.-En la etapa siguiente debe obtenerse, a partir del anterior conjunto de parejas de valores; (V_{EBmi} , I_{Cmi}), un segundo conjunto de parejas de valores, cada nueva pareja estará formada por el mismo primer término anterior, es decir, V_{EBmi} , que es el valor del voltaje de polarización directa V_{EBmi} que generó la corriente I_{Cmi} . El segundo término lo constituye el resultado de multiplicar I_{Cmi} por la cantidad $\exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$, es decir, el segundo término está dado por $(I_{Cmi}) \times [\exp(-qV_{EBmi}/kT_a)]$. Donde q representa el valor de la carga del electrón, k la constante de Boltzmann y T_a es un valor de temperatura absoluta, que es un parámetro de ajuste que se debe determinar conforme al apartado 6 descrito más adelante.

30

4.-El valor de temperatura absoluta T_a introducido en la etapa anterior, es un parámetro de ajuste que permite, mediante el procedimiento descrito en la etapa 6 presentada a continuación, determinar la temperatura buscada.

5 5.-A continuación se debe construir la gráfica de $(I_{Cmi}) \times [\exp(-qV_{EBmi}/kT_a)]$ en función de V_{EBmi} , utilizando el conjunto de parejas $(V_{EBmi}, (I_{Cmi}) \times [\exp(-V_{EBmi}/kT_a)])$ obtenido en la etapa 3 anterior. Evidentemente en esta gráfica los valores de V_{EBmi} corresponden al eje de las abscisas y los valores del producto $(I_{Cmi}) \times [\exp(-qV_{EBmi}/kT_a)]$ al eje de las ordenadas.

10

6.-Se prosigue con la determinación del valor del parámetro de ajuste T_a , introducido en el punto 3 anterior, que permita obtener una porción de la gráfica establecida en el punto 5 anterior, que sea una recta con pendiente igual a cero, es decir, que sea paralela al eje de las abscisas donde se han reportado los valores de V_{EBmi} . Si para T_a se propone un valor diferente a T_m , el valor real de temperatura a la que se encontraba el transistor al momento de la medición, la porción de la gráfica que es una recta tendrá pendiente diferente de cero, es decir que no será paralela al eje V_{EB} .

15 7.-El valor particular de T_a , para el cual se satisface la condición establecida en el punto 6 anterior, es el valor de la temperatura absoluta a la cual se encuentra el transistor al momento de efectuar la medición y obtención de los valores V_{EBmi} e I_{Cmi} y en consecuencia, es también la del medio con el cual, el mencionado transistor usado como sensor de temperatura y/o termómetro, está en contacto y equilibrio térmico.

25

La propuesta del punto 3 anterior de multiplicar los valores obtenidos experimentalmente para la corriente de colector $I_{Cmi}(V_{EBmi})$, por el multiplicando dado por la ecuación

30

$$\exp(-qV_{EBmi}/kT_a), \quad (4)$$

es decir, efectuar la operación matemática: $I_{Cmi}(V_{EBmi}) \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$, donde $I_{Cmi}(V_{EBmi})$ es la corriente de colector previamente medida al haber aplicado un voltaje de polarización entre emisor-base igual a V_{EBmi} y T_a , es una temperatura absoluta, inicialmente de valor arbitrario, conduce a la situación descrita a continuación. La

5 operación matemática anterior al considerar la ley que gobierna $I_{Cmi}(V_{EBmi})$, el resultado es igual a:

$$I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a) = I_{DS} \exp[qV_{EBmi} (T_m - T_a)/k(T_m T_a)] \exp[-qR_s I_{Cmi}/kT_m] +$$

10 $+ [R_p/(V - I_{Cmi}R_s)] \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ (5)

Sin embargo, como se ha dicho antes, existe un rango para la corriente de colector I_C donde únicamente el primer término de la derecha de la ecuación (5) tiene valor significativo, si adicionalmente se tiene que $R_s I_{Cmi} \ll kT_m$, entonces la ecuación (5)

15 se reduce a

$$I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a) = I_{DS} \exp[qV_{EBmi} (T_m - T_a)/k(T_m T_a)]$$
 (6)

De esta manera se tiene que, si y solo si la temperatura propuesta T_a en el término

20 multiplicador dado en la ecuación (4), toma rigurosamente el mismo valor de temperatura al cual el transistor bipolar fue operado durante la medición de los valores experimentales de I_{Cmi} , el producto indicado en la ecuación (6) adquiere un valor constante igual al término preexponencial I_{DS} de la ecuación (6), es decir,

$$25 \quad I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a) = I_{DS}$$
 (7)

Es por ello que, al construir una gráfica de la ecuación (6), como se establece en la

etapa 5 anterior, se obtiene una figura conteniendo una porción constituida por una

30 línea recta de pendiente cero, o sea paralela al eje V_{EB} .

Sin embargo, si para T_a se propone un valor diferente a T_m , el valor real de temperatura a la que se encontraba el transistor al momento de la medición, se generará esa porción de recta con pendiente diferente de cero, es decir que no será paralela al eje V_{EB} . Esto se ilustra en las figuras 2, 4, 5, 7, y 9.

5

Las figuras 1 a 10 ilustran el uso de este método pero de ninguna manera se limita a estos casos. Para ejemplificar el uso del método aquí propuesto se han seleccionado cuatro casos que ilustran su aplicación usando; un transistor de Germanio (Ge) a homounión, uno de Silicio (Si) igualmente a homounión, un transistor degradado con ganancia de corriente menor a uno y finalmente, un transistor a heterounión de la familia de semiconductores III-V, todos ellos comerciales.

10

Ejemplo 1.-

15 En el primero ejemplo, figuras 1 y 2, se ha usado un transistor comercial de germanio. Con él, se ha medido la temperatura de un cuerpo con el que se puso en equilibrio térmico. Inicialmente, en la Figura 1 se muestra la gráfica de la corriente de colector $I_C(V_{BE})$ en función del voltaje aplicado entre emisor y base, V_{BE} .

20 En la figura 2, se tiene la gráfica del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$, para el conjunto de valores obtenidos, $I_{Cmi}(V_{BEmi})$, en función de V_{EB} , tal y como se describe en la sección "DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCIÓN". En la construcción de la figura 2, con el propósito de ilustrar detalladamente el método aquí propuesto, se han utilizando tres valores diferentes para el parámetro T_a , que debe proponerse en la ecuación (5), obteniéndose así, tres curvas (A, B y C). Cada una de esas curvas contiene una porción de recta y cada una de esas partes rectas se caracteriza por una pendiente propia diferente de las otras. Y se tiene que, UNA Y SOLO UNA de esas rectas resulta con una pendiente igual a CERO, es decir, paralela al eje V_{EB} , y es el valor de T_a utilizado en la obtención de este particular conjunto de valores el que corresponde a la temperatura a la que se encuentra al transistor al momento de la toma de los valores de corriente de colector, es decir, 240.7 K.

30

Ejemplo 2.-

La figura 3, muestra la aplicación del método usando un transistor de Silicio monocristalino comportando homo uniones tanto en la unión emisor-base como en la unión base-colector, la ganancia de corriente de este transistor es de 210. En este caso, se midieron dos temperaturas, una inferior a la ambiente y la otra cercana a la temperatura ambiente. Entonces, como se ha establecido, se obtuvo el conjunto de valores de corriente de colector en función del voltaje de polarización directa entre emisor y base: $I_{Cmi}(V_{BEmi})$, para cada una de las condiciones de temperatura que desean medirse. Las Figuras 4 y 5, ilustran nuevamente el graficado de los productos $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$ en función de V_{BE} , para cada uno de esos conjuntos de valores de corriente de colector. Como en el primer ejemplo aquí presentado, en cada una de ellas se muestra la gráfica del producto obtenido para tres valores de temperatura propuestos de T_a , con el objeto de ilustrar nuevamente que es UNO Y SOLO UNO el que conduce a una pendiente de la gráfica igual a cero y que es el que proporciona el valor de la temperatura a la cual se encontraba el transistor al momento de la obtención de los valores de la corriente de colector, 118.7 K y 279 K.

Ejemplo 3.-

En este ejemplo se ha usado un transistor comercial constituido por semiconductores de la llamada familia III-V, con la hetero-unión GaInP-GaAs en la unión base-emisor y una homo-unión GaAs-GaAs en la unión base-colector.

En la Figura 6 se muestra la gráfica de la corriente de colector $I_C(V_{BE})$ en función del voltaje aplicado entre emisor y base, V_{BE} . En la figura 7, se tiene la gráfica del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$, para el conjunto de valores obtenidos, $I_{Cmi}(V_{BEmi})$, en función de V_{EB} , tal como se describe en la sección "DESCRIPCION DETALLADA DE LA INVENCION". En la construcción de la figura 7, con el propósito de ilustrar detalladamente el método aquí propuesto, se han utilizando tres valores diferentes para el parámetro T_a , que debe proponerse en la ecuación (5), obteniéndose así, tres curvas; (A, B y C). Cada una de esas curvas contiene una porción de recta y cada una de esas partes rectas se caracteriza por una pendiente propia diferente

de las otras. Y se tiene que, UNA Y SOLO UNA, de esas rectas resulta con una pendiente igual a CERO, es decir paralela al eje V_{EB} , y es el valor de T_a utilizado en la obtención de este particular conjunto de valores el que corresponde a la temperatura a la que se encuentra al transistor al momento de la toma de los valores de corriente de colector, es decir 413.6 K.

Ejemplo 4.-

En este caso se ilustra como un transistor que por uso se ha degradado perdiendo su ganancia de corriente hasta valores menores a la unidad (la ganancia de corriente de este transistor bipolar en función del voltaje emisor-base se muestra en la figura 10). La figura 9, muestra la gráfica del producto $I_{Cmi} \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$, para el conjunto de valores obtenidos, $I_{Cmi}(V_{BEmi})$, en función de V_{EB} , tal y como se describe en la sección "DESCRIPCION DETALLADA DE LA INVENCION". En la construcción de la figura 9, con el propósito de ilustrar una vez más el método aquí propuesto, se han utilizando tres valores diferentes para el parámetro T_a , que debe proponerse en la ecuación (5), obteniéndose así, tres curvas (A, B y C). Cada una de esas curvas contiene una porción de recta y cada una de esas partes rectas se caracteriza por una pendiente propia diferente de las otras. Y se tiene que, UNA Y SOLO UNA, de esas rectas resulta con una pendiente igual a CERO, es decir, paralela al eje V_{EB} , y es el valor de T_a utilizado en la obtención de este particular conjunto de valores el que corresponde a la temperatura a la que se encuentra al transistor al momento de la toma de los valores de corriente de colector, es decir 393.92 K.

Reivindicaciones.

Habiendo descrito la presente invención, se considera y reclama como propiedad lo contenido en las siguientes cláusulas:

5

1.-Un método que permite usar un transistor bipolar como un preciso sensor de temperatura y/o termómetro autocalibrado que comprende las etapas siguientes:

10

a) Poner el transistor bipolar que medirá la temperatura en contacto térmico adecuado con el medio cuya temperatura se desea medir.

15

b) Obtener, para el mencionado transistor bipolar usado como sensor de temperatura o termómetro autocalibrado, un conjunto de parejas de valores; (V_{EBmi} , I_{Cmi}). Es decir, que cada pareja de datos debe estar constituida por: el voltaje aplicado entre las terminales emisor-base, polarizándola en directo, V_{EBi} , y la correspondiente corriente eléctrica circulando por el colector, I_{Ci} , manteniendo la unión base-colector sin polarización alguna o en polarización inversa, al mismo tiempo que se mide la corriente eléctrica que circula por esta unión. Donde (i) representa el i -ésimo valor del voltaje de polarización directa aplicado entre las terminales de emisor y base del mencionado transistor, que genera a su vez, la i -ésima corriente de colector.

20

25

c) En la etapa siguiente debe obtenerse, a partir del anterior conjunto de parejas de valores (V_{EBmi} , I_{Cmi}), un segundo conjunto de parejas de valores; cada nueva pareja estará formada por el mismo primer término anterior, es decir, V_{EBmi} , que es el valor del voltaje de polarización directa V_{EBmi} que produce la corriente I_{Cmi} . El segundo término, lo constituye el resultado de multiplicar I_{Cmi} por la cantidad $\exp(-qV_{EBmi}/kT_a)$, es decir, $(I_{Cmi}) \times [\exp(-qV_{EBmi}/kT_a)]$. Donde q representa el valor de la carga del electrón, k la constante de Boltzmann y T_a es un valor de temperatura absoluta que es un parámetro de ajuste que se debe determinar conforme al apartado f) descrito más adelante.

30

d) El valor de temperatura absoluta T_a introducido en la etapa anterior, es un parámetro de ajuste que permite, mediante el procedimiento descrito en la etapa f) presentada a continuación, determinar la temperatura buscada.

5 e) A continuación, se debe construir la gráfica de $(I_{Cmi}) \times [\exp(-qV_{EBmi}/kT_a)]$ en función de V_{EBmi} , utilizando el conjunto de parejas $(V_{EBmi}, (I_{Cmi}) \times [\exp(-qV_{EBmi}/kT_a)])$ obtenido en la etapa c) anterior. Evidentemente en esta gráfica los valores de V_{EBmi} corresponden al eje de las abscisas y los valores del producto $(I_{Cmi}) \times [\exp(-qV_{EBmi}/kT_a)]$ al eje de las ordenadas.

10

f) Se prosigue con la determinación del valor del parámetro de ajuste T_a , introducido en el punto c) anterior. El parámetro de ajuste T_a debe de tomar un valor tal que permita obtener una porción de la gráfica establecida en el punto e) anterior, que sea una recta con pendiente igual a cero, es decir, que sea paralela al eje de las abscisas donde se han reportado los valores de V_{EBmi} .

15

g) El valor particular de T_a , para el cual se satisface la condición establecida en el punto f) anterior, es el valor de la temperatura absoluta a la cual se encontraba funcionando el transistor al momento de efectuar la medición y obtención de los valores V_{EBmi} e I_{Cmi} y en consecuencia, es también la temperatura del medio con el cual, el mencionado transistor usado como sensor de temperatura y/o termómetro, si está en equilibrio térmico con él.

20

2.-Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar que puede ser de cualquier tipo NPN o PNP.

25

3.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar de características geométricas arbitrarias y la precisión con la que mide la temperatura es independiente de las superficies de los elementos activos del transistor, tales

30

como emisor, base y colector; así como, de las relaciones entre las áreas o superficies activas de esos elementos del transistor.

- 5 4.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar en el que sus parámetros de transporte de corriente eléctrica tales como corrientes de saturación del diodo emisor-base y su factor de idealidad no tienen ningún efecto sobre la precisión con la que se efectúa la medición de temperatura.
- 10 5.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar en el que los elementos activos del transistor como emisor, base y colector, pueden estar hechos de materiales monocristalinos, policristalinos, amorfo o combinaciones de éstos.
- 15 6.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar hecho en película delgada que sea flexible.
- 20 7.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar que puede tener cualquier valor de ganancia de corriente, y aún valores menores a la unidad, es decir transistores sin ganancia de corriente.
- 25 8.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar que puede ser de cualquier tipo: un transistor bipolar de homo-unión o bien a hetero-unión.
- 30 9.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar que sea del tipo de heterounión, donde dicha hetero-unión puede estar en cualquiera de las dos uniones del transistor bipolar: emisor-base, base-colector o en ambas.

- 10.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar en el cual sus elementos o partes activas y/o pasivas, tales como emisor, base, colector, y otras partes como sub-colector o películas adicionales para reducir resistencias en serie parásitas incluidas en el mencionado transistor, pueden ser de cualquiera de los semiconductores elementales obtenidos al emplear cualquiera de los elementos químicos de la columna IV de la tabla periódica como Silicio, Germanio y Carbón o cualquiera de sus aleaciones de cualquier composición.
- 5
- 11.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar en el cual sus elementos o partes activas y/o pasivas tales como emisor, base, colector y otras partes como sub-colector o películas adicionales para reducir resistencias en serie parásitas incluidas en el mencionado transistor, puede ser de cualquiera de los semiconductores compuestos obtenidos al emplear cualquiera de los elementos químicos de las columnas III y V de la tabla periódica, tales como: GaAs, InP, InSb, GaN, AlN, InN,... o cualquier otra aleación de cualquier composición de la misma familia de materiales semiconductores.
- 10
- 15
- 12.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar en el cual sus elementos o partes activas y/o pasivas tales como emisor, base, colector y otras partes como sub-colector o películas adicionales para reducir resistencias en serie parásitas incluidas en el mencionado transistor bipolar puede ser de cualquiera de los semiconductores compuestos obtenidos al emplear cualquiera de los elementos químicos de las columnas II y VI de la tabla periódica; tales como CdTe, HgTe, ZnTe, etc., o cualquier otra aleación de cualquier composición de la misma familia de materiales semiconductores.
- 20
- 25
- 13.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar en el cual los elementos parásitos que inevitablemente contiene, como resistencias en serie de
- 30

emisor, base y colector, y resistencias parásitas en paralelo no introducen errores importantes en la medición de temperatura.

5 14.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar en el cual la evolución, por uso de los elementos parásitos del transistor bipolar tales como resistencias en serie y en paralelo, no introducen errores importantes en el valor de la temperatura medida.

10 15.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar en el cual la evolución, por uso de los parámetros físicos del transistor tales como ganancia de corriente, impurificación activa en cada región, etc., no introduce un error importante en el valor de la temperatura censada o medida. Lo que hace el método
15 particularmente bien adaptado para su uso en ambientes física y químicamente agresivos.

16.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite operar el transistor bipolar en regiones
20 inmersas en campos magnéticos sin introducir errores en la determinación de la temperatura.

17.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar en el cual,
25 dicho transistor puede ser un dispositivo discreto o ser parte de un circuito integrado, de un circuito híbrido, o de un sistema que incluye la realización de la funciones necesarias a la medición o censado de la temperatura.

18.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar para el cual
30 su corriente de colector es una función del voltaje de polarización directa, aplicado

entre emisor-base, V_{EB} , del tipo dado por la ecuación $I_C(V_{EB}) = I_{DS}(T) \cdot \exp(qV_{EB}/kT)$, donde $I_{DS}(T)$ es un término pre-exponencial que es dependiente de las propiedades físicas de los materiales constituyentes del transistor, de su geometría y de la temperatura absoluta a la cual el mencionado transistor bipolar es operado mientras se realiza la determinación o medición de temperatura, q es el valor de la carga del electrón, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta a la cual se encuentra el transistor mencionado.

19.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar un transistor bipolar para el cual el proceso de medición y/o obtención de las parejas de datos; V_{EBi} , I_{Ci} , necesarias a la determinación de la temperatura pueden obtenerse usando cualquier instrumento de medición adecuado y/o sistema comercial de medición de corriente-voltaje o bien un sistema electrónico desarrollado en forma expresa para éste propósito.

20.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar, en la determinación de la región de valores de V_{EB} para los cuales se cumple que la gráfica del producto $I_{Cmi}(V_{EBmi}) \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_0)$ en función de V_{EB} presenta un valor de pendiente igual a cero, cualquier método apropiado para ello.

21.- Es un método para utilizar un transistor bipolar como sensor y/o termómetro autocalibrado, caracterizado porque permite usar, un transistor bipolar integrado en un circuito integrado de cualquier tecnología; bipolar o MOS (Metal-Oxido-Semiconductor) o conteniendo ambas con el propósito de medir la temperatura de operación del circuito integrado en el que se encuentra inmerso.

22.- Es un método que es igualmente válido para utilizar cualquier dispositivo electrónico en el que, la corriente que fluye a través de él sea una función de la temperatura, tal y como lo establece la ecuación 3. Como es el caso, por ejemplo, de un diodo a base de una barrera metal-semiconductor, también conocida como

barrera Schottky. En cuyo caso el metal puede ser cualquier metal, o aleaciones metálicas o multicapas metálicas y el semiconductor pueden ser cualquier material semiconductor siempre que entre ellos se establezca una barrera de energía adecuada donde la corriente que circula por ella cuando se polariza adecuadamente se cumpla lo establecido por la ecuación 3.

5

Resumen.

Esta invención proporciona un método para utilizar un transistor bipolar como sensor de temperatura y/o un termómetro autocalibrado, inmune a errores por elementos parásitos como resistencias o factores de idealidad y a su evolución. En este método los valores de corriente de colector, I_{Cmi} en función del voltaje directo, V_{EBmi} emisor-base, son graficados en la forma del producto $I_{Cmi}(V_{EBmi}) \times \exp(-qV_{EBmi}/kT_0)$, en función del voltaje emisor-base V_{EB} . T_0 es un parámetro conducente a que una región de ésta gráfica tenga pendiente cero, siendo a la vez la temperatura absoluta del transistor al momento de obtener la corriente de colector I_{Cmi} en función del voltaje, V_{EBmi} .

FIGURA 1

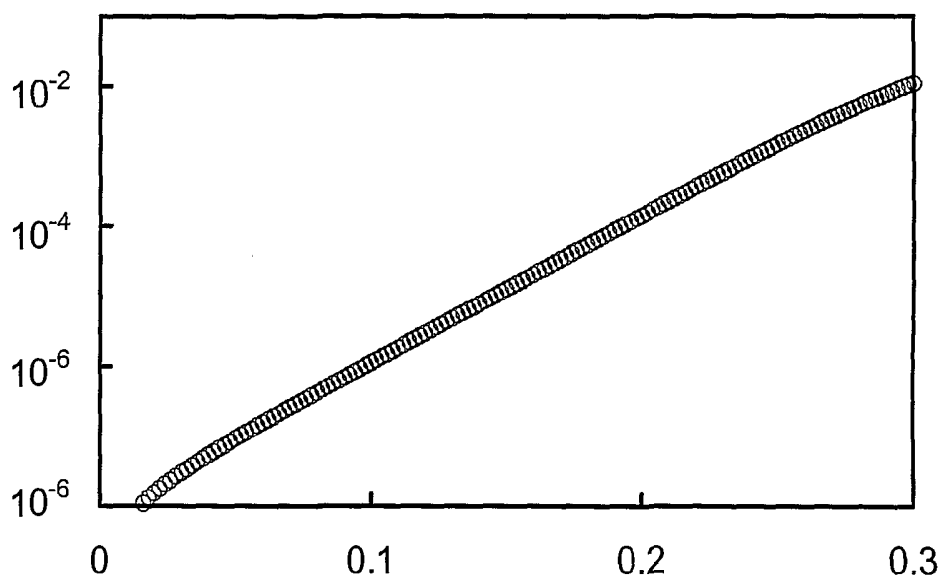


FIGURA 2

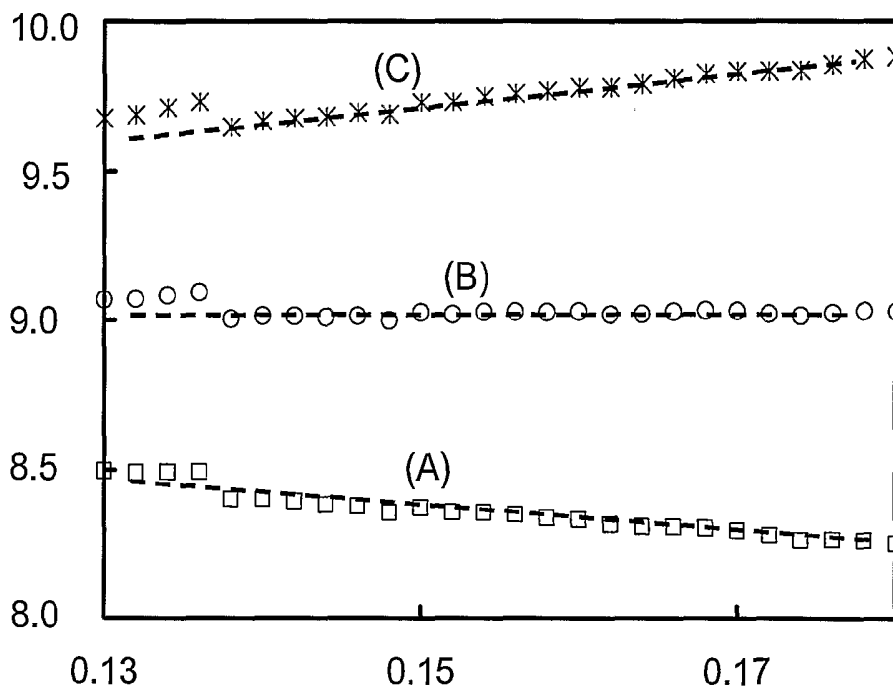


FIGURA 3

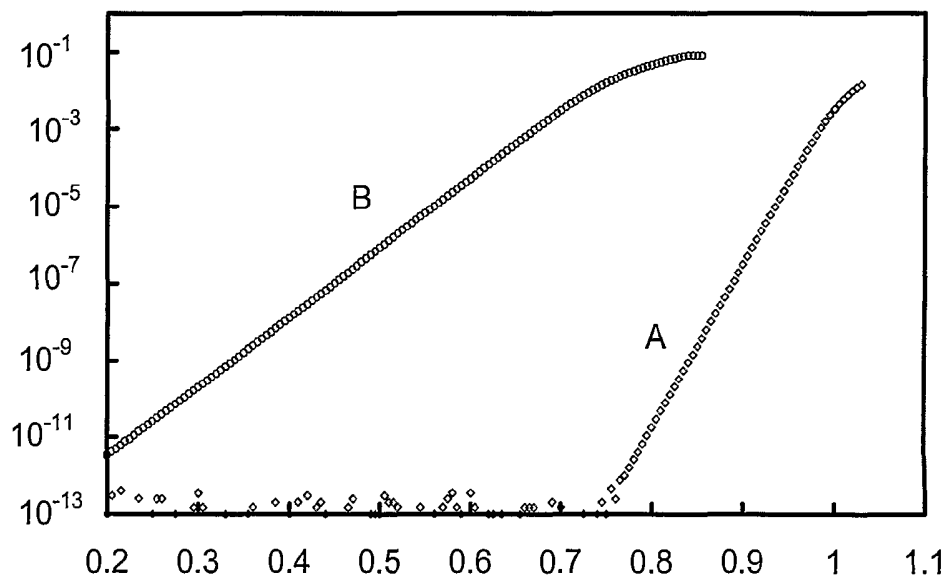


FIGURA 4

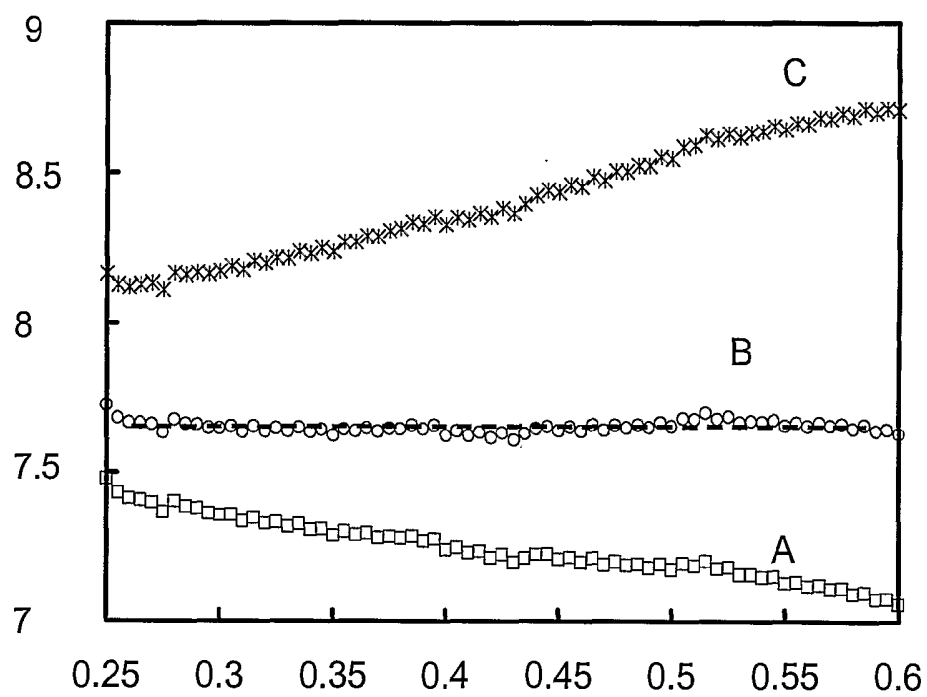


FIGURA 5

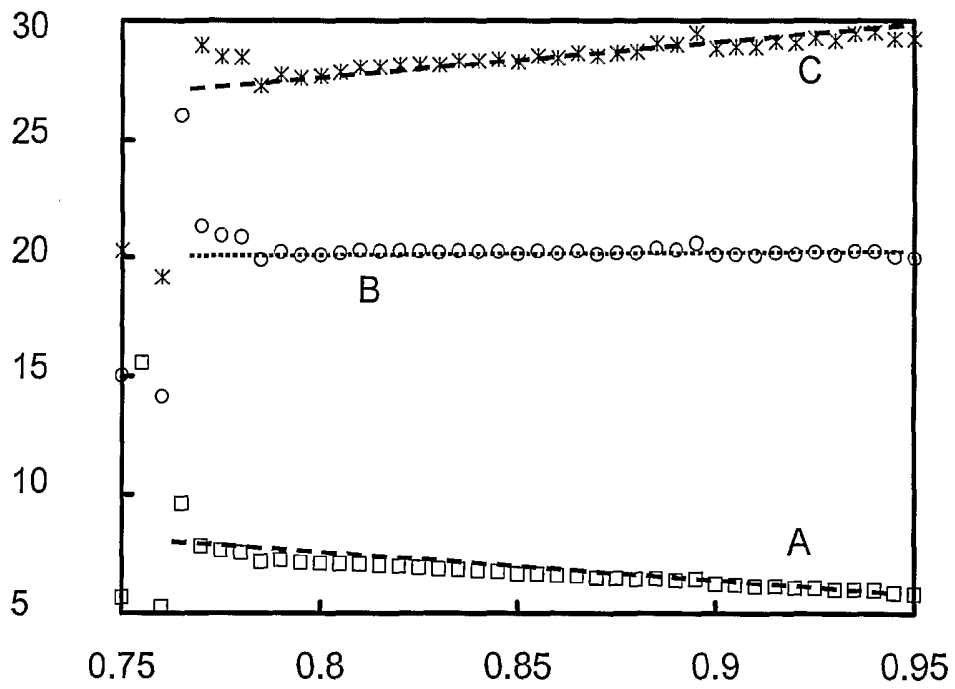


FIGURA 6

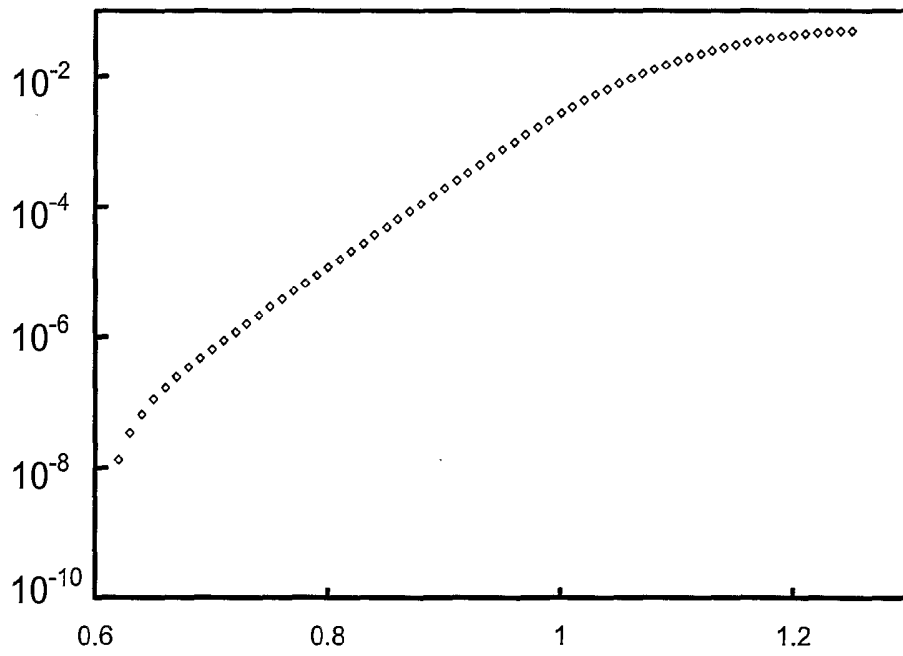


FIGURA 7

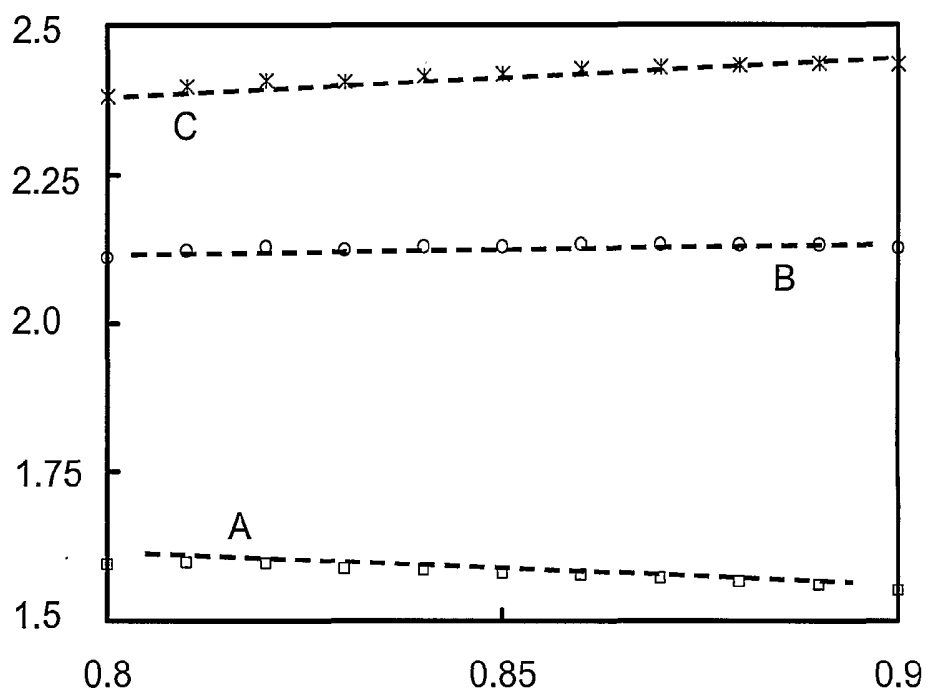


FIGURA 8

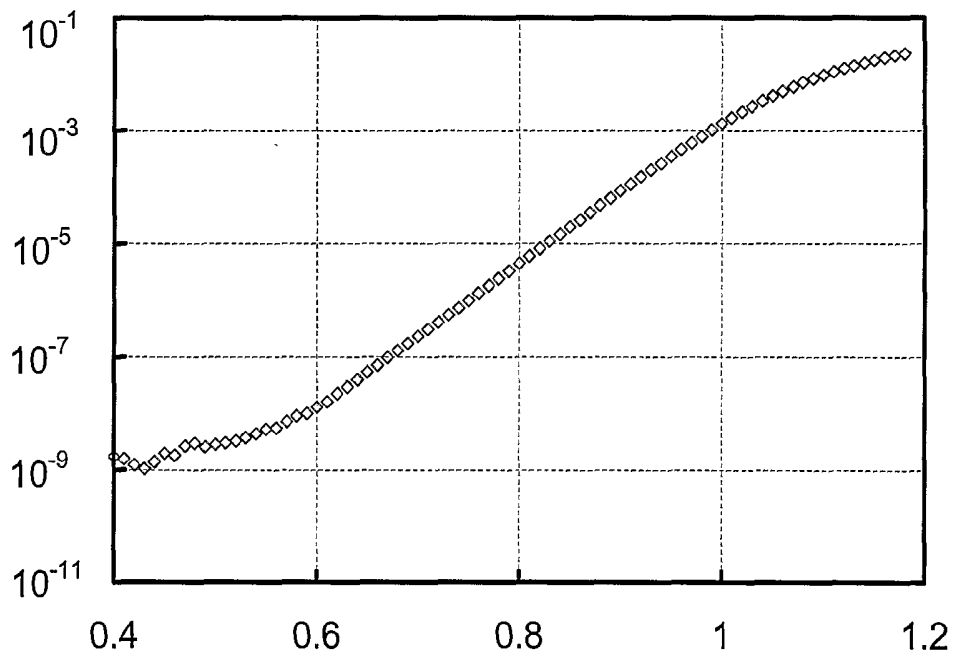


FIGURA 9

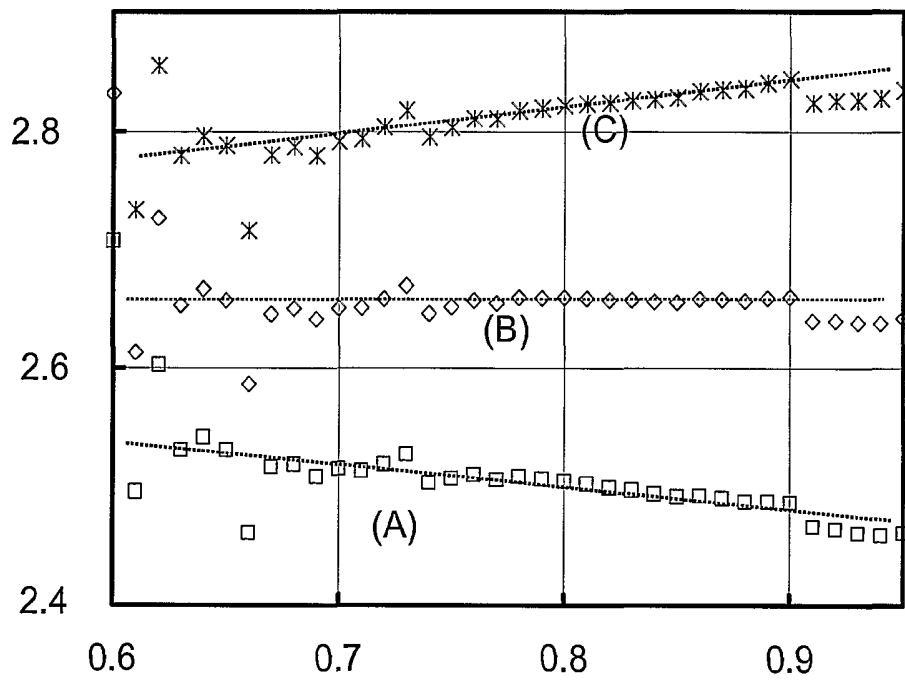


FIGURA 10

