



Efectos físicos en el transistor bipolar: modelación y extracción de parámetros

Agnes S. Nagy¹, Alicia Polanco Risquet¹

RESUMEN

La complejidad creciente de los sistemas electrónicos, el escalado de las dimensiones con nuevos nodos tecnológicos y el incremento de las frecuencias de trabajo, demandan circuitos integrados cada vez más exactos y estables. Para lograrlos se requiere de programas de simulación cada vez más precisos durante el proceso de diseño. El PSPICE, ampliamente utilizado para simular el comportamiento general de los circuitos integrados no considera mucho de los efectos físicos que se encuentran en los dispositivos reales. Para superar estas limitaciones, hace varias décadas se están desarrollando modelos compactos como los de HICUM y MEXTRAM basados en los efectos físicos que tienen lugar dentro de los dispositivos integrados. En este trabajo se presentan algunos aspectos físicos que no han sido estudiados con profundidad, tal como la influencia del coeficiente de emisión del emisor en la expresión del voltaje base-emisor del transistor bipolar, la explicación y modelación física del coeficiente de emisión, el efecto de la capacidad neutral en la modelación de la capacidad del emisor, así como un método de extracción del potencial de contacto $V_{DE}(T)$, cuyos resultados muestran una concordancia excelente con los resultados teóricos.

Palabras claves: Efectos físicos, coeficiente de emisión, capacidad del emisor, potencial de contacto, transistor bipolar

ABSTRACT

The rising complexity of electronic systems, the reduction of components size with the new technological nodes, and the increase of working frequencies, demand every time more accurate and stable integrated circuits, which require more precise simulation programs during the design process. The PSPICE, widely used to simulate the general behavior of integrated circuits, does not consider many of the physical effects that can be found in real devices. Compact models HICUM and MEXTRAM, have been developed over recent decades, in order to eliminate this deficiency. This work presents some of the physical aspects that have not been studied so far, such as; the expression of base emitter voltage, including the emitter emission coefficient effect (n); physical explanation and modeling of emission coefficient, the effect of neutral capacitance in modeling of emitter capacitance, as well as a new extraction method for the diffusion potential $V_{DE}(T)$, based on the forward biased base-emitter capacitance; showing excellent agreement between experimental and theoretical results.

Key words: Physical effects, emission coefficient, emitter capacitance, built-in voltage, bipolar transistors

Physical effects in bipolar transistor: Modeling and parameters extraction

INTRODUCCION

En la actualidad los transistores bipolares, debido a su comportamiento favorable, son muy utilizados en operaciones de altas frecuencias (comunicación inalámbrica de 60 GHz), en la industria automotriz para prevenir y evitar choques (rango de 24 a 77 GHz), en el área de la electrónica analógica de precisión y en circuitos de señales mixtos¹.

La modelación del transistor bipolar ha sido caracterizada por un incremento continuo de su complejidad, empezando por los modelos de Ebers-Moll² y Gummel-Poon³ de primera generación, hasta los modelos compactos de hoy, mucho más sofisticados, como HICUM^{4,1,5,6,7}, Mextram 504^{8,7,9} y VBIC¹⁰, impulsados por el desarrollo tecnológico, las necesidades de las nuevas áreas de aplicación y el alto costo de las iteraciones para rectificar un diseño.

La modelación compacta se refiere al desarrollo de modelos que permiten la simulación eléctrica de dispositivos semiconductores integrados en función de los nodos tecnológicos, para el cual se basa en el estudio de los efectos físicos, su modelación y la extracción de parámetros convenientes. Por las razones anteriores el modelo compacto es el vehículo más importante para la transferencia de la información de la tecnología de fabricación al circuito y al producto diseñado.

La dependencia de la industria de los modelos compactos exactos y eficientes en el tiempo sigue aumentando según aumenta la frecuencia de operación de los circuitos, y disminuye la tolerancia de los dispositivos debido al escalado de las dimensiones mínimas, con lo que aumenta el número de dispositivos en un chip, y el contenido analógico de los circuitos con señales mixtas, a la vez que aumenta también el costo de las iteraciones para rectificar un diseño.

MODELACIÓN DE PARÁMETROS DEL TRANSISTOR BIPOLAR

En este trabajo se presenta el análisis de algunos efectos físicos que tienen lugar en los transistores bipolares, su modelación y la extracción de los parámetros correspondientes.

La primera parte del artículo se dedica al análisis con un enfoque físico de algunos parámetros del transistor bipolar poco estudiados en la literatura, que permiten introducir modificaciones en los modelos existentes u obtener nuevos modelos.

MODELO DE $V_{BE}(T)$ MODIFICADO POR EL COEFICIENTE DE EMISIÓN DEL EMISOR $n(T)$

La expresión del voltaje $V_{BE}(T)$ reportado en la literatura ha sido obtenido a partir de la corriente de colector. La corriente de colector en un transistor bipolar trabajando en la región activa, a bajos niveles de corriente y despreciando el coeficiente de emisión y los efectos Early inversa y directa viene dada por¹².

$$I_C(T) = I_S(T) \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}(T)}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

donde T es la temperatura absoluta, $V_{BE}(T)$ el voltaje base-emisor, q la carga del electrón y k la constante de Boltzman ($8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/K). El término -1 puede ser despreciado cuando la corriente inyectada es mucho mayor que la corriente de saturación $I_S(T)$.

La expresión de $V_{BE}(T)$ obtenida de la ecuación (1) por Tsividis¹² se conoce como "expresión exacta" y está dada por

$$V_{BE}(T) = V_G(T) - V_G(T_r) \frac{T}{T_r} + V_{BE}(T_r) \frac{T}{T_r} - (\eta - m) \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{T}{T_r} \right] \quad (2)$$

Donde η es un parámetro relacionado con la movilidad de los portadores minoritarios en la base, m es el parámetro que determina la dependencia de la corriente de colector con la temperatura, $V_{BE}(T_r)$ y $V_G(T_r)$ son el voltaje base-emisor y el voltaje de la banda prohibida a la temperatura de referencia T_r ^{11,12}.

Para mejorar la descripción de $V_{BE}(T)$ los efectos Early directo e inverso han sido discutidos^{13,14}, sin embargo el coeficiente de emisión y su influencia en $V_{BE}(T)$ no han sido estudiados por otros.

El coeficiente de emisión del emisor, típicamente se considera como un parámetro de valor constante próximo a uno. Sin embargo

la variación del coeficiente de emisión del emisor con la temperatura ha sido medida y reportada en la literatura ¹¹, mostrando un aumento no esperado (y no explicado) para bajas temperaturas (230 K – 300 K).

Considerando el efecto del coeficiente de emisión $n(T)$, la corriente del colector puede ser escrito como:

$$I_C(T) = I_S(T) \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}(T)}{n(T)kT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

De la ecuación (3) se obtiene la siguiente expresión para $V_{BE}(T)$:

$$V_{BE}(T) = n(T) \left[V_G(T) - V_G(T_r) \frac{T}{T_r} \right] + V_{BE}(T_r) \frac{T}{T_r} \frac{n(T)}{n(T_r)} - n(T)(\eta - m) \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{T}{T_r} \right] \quad (4)$$

La ecuación (4) muestra que el voltaje $V_{BE}(T)$ se afecta no solo por el valor, sino también por la variación del coeficiente de inyección con la temperatura.

Para interpretar la influencia de $n(T)$ en $V_{BE}(T)$ se puede diferenciar tres casos:

- $n = 1$ para todos los rangos de temperatura: en este caso la ecuación (4) se reduce a la expresión reportada en la literatura
- $n > 1$ y es constante para todos los rangos de temperatura: en este caso $n(T) = n(T_r)$, por lo que el único término no afectado por el coeficiente de emisión es el término lineal con la temperatura.
- $n > 1$ y varía con la temperatura: en este caso todos los términos son afectados

Este resultado implica la necesidad de caracterizar la variación del coeficiente de emisión con la polarización y la temperatura.

MODELO DEL COEFICIENTE DE EMISIÓN $n(T)$ CON ENFOQUE FÍSICO

Muchos autores consideran el coeficiente de emisión n , como en el modelo Gummel-Poon del PSPICE, un parámetro de valor constante, próximo a uno, para explicar las no idealidades de la dependencia exponencial de la corriente de colector I_C con el voltaje emisor base. Sin embargo, en el modelo original Gummel-Poon [3] n no es un parámetro, sino está definido como el recíproco de la pendiente Gummel plot a un valor de V_{CB} y T , dado para bajo nivel de inyección por:

$$n \approx 1 + \frac{kT C_e}{q Q_{b0}} \quad (5)$$

donde C_e es la capacidad del emisor y Q_{b0} es la carga en la base para polarización cero, la cual puede ser considerada constante.

Retomando la expresión (5) de Gummel-Poon, el comportamiento del coeficiente de emisión n , dependiente del voltaje de polarización en directa y de la temperatura, puede ser enfocado físicamente a través de la variación de la capacidad del emisor en función de estos parámetros:

$$n(V_{BE}, T) = 1 + \frac{\frac{kT}{q} C_e(V_{BE}, T)}{Q_{b0}} \quad (6)$$

La ecuación (6) permite una aproximación física al comportamiento de n con la temperatura y polarización directa, a través de $C_e(V_{BE}, T)$, cuya modelación ha sido tratada ^{3,4,15,16,17} en la literatura.

NUEVA FORMULACIÓN DEL MODELO DE LA CAPACIDAD DEL EMISOR $C_e(V_{BE}, T)$

Aunque la capacidad del emisor $C_e(T)$ ha sido extensamente tratada en la literatura, el estudio cuidadoso de los modelos de C_e reportados detectó algunas limitaciones de estos ¹⁸. Los resultados experimentales de medición de C_e realizados con transistores bipolares MAT01 mostraron un resultado no esperado: un incremento exponencial de la capacidad del emisor ^{18,19} que no ha sido

considerado en ninguno de los modelos reportados.

En la figura 1 se muestran los resultados experimentales de medición de C_e y su simulación con los modelos Ideal², Gummel-Poon³ y HICUM⁴. Todos los parámetros de simulación fueron extraídos de las mediciones experimentales.

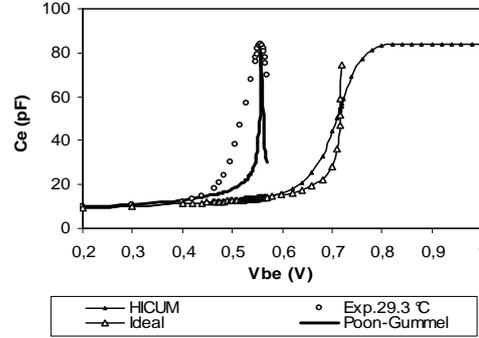


Figura 1. Valores experimentales y simulados de C_e a 29°C

Como se puede observar, ninguno de los modelos sigue el crecimiento exponencial que muestran las mediciones experimentales, y todos predicen el incremento de C_e para voltajes de polarización directa superiores al experimental. El modelo de Gummel-Poon predice un pico simétrico alrededor del valor máximo $C_{e\text{máx}}$.

La explicación de la causa física que provoca la variación exponencial de la capacidad del emisor fue encontrada en la capacidad neutral C_n de la unión²⁰ que se pone de manifiesto a partir de cierta polarización directa de la unión emisor-base, y no se tiene en cuenta en los modelos compactos de C_e reportados hasta el año 2006^{21,19,6}.

Por esta razón era necesario desarrollar un nuevo modelo de C_e que incluye la capacidad neutral para describir el crecimiento exponencial de C_e con el aumento del voltaje de polarización directa.

El nuevo modelo fue construido utilizando las expresiones de la capacidad de carga espacial C_{sc} y de la capacidad neutral C_n , entrelazadas mediante una función suavizadora^{21,19}, como se puede observar en la ecuación (7).

$$C_e(V_{BE}, T) = f(V_{BE})C_{sc}(T) + C_n(T) \quad (7)$$

siendo $f(V_{BE})$ la función suavizadora, definida en el intervalo de voltaje $[V_{BE1}, V_{BE2}]$ y dada por

$$f(V_{BE}) = \frac{1}{1 + e^{\lambda(V_{BE} - \alpha)}} \quad (8)$$

cuyos parámetros son

$$\alpha = \frac{V_{BE1} + V_{BE2}}{2} \quad \lambda = \frac{\ln 99}{\delta} \quad \delta = \frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{2}$$

donde

- V_{BE2} es el voltaje base-emisor $V_{BE\text{máx}}$ a $C_{e\text{máx}}$
- V_{BE1} es el valor tope del voltaje base-emisor que satisface la condición de carga espacial, teniendo en cuenta las mediciones experimentales

El modelo Ideal o capacidad de carga espacial está dado^{2,4} por,

$$C_{je} = \frac{C_{je0}}{[1 - V_{BE}/V_{DE}]^Z} \quad (9)$$

donde, V_{DE} es el voltaje de difusión o altura de la barrera de potencial y el exponente z depende del tipo de unión.

La dependencia de la capacidad del emisor de la temperatura con cero polarización ⁴ está dado por,

$$C_{je0}(T) = C_{je0}(T_r) \left(\frac{V_{DE}(T_r)}{V_{DE}(T)} \right)^z \quad (10)$$

$C_{je0}(T)$ reportada en la literatura, representa el término $C_{sc}(T)$ en la ecuación (7).

También es conocida la dependencia del voltaje de difusión con la temperatura, reportado por Schroter ⁴:

$$V_{DE}(T) = V_{G0} \left(1 - \frac{T}{T_r} \right) + V_{DE}(T_r) \frac{T}{T_r} - 3V_T \ln \left(\frac{T}{T_r} \right) \quad (11)$$

donde $V_{DE}(T_r)$ es el potencial de difusión a la temperatura de referencia T_r .

El segundo término de la ecuación (7) representa la capacidad neutral $C_n(V_{BE}, T)$, obtenida utilizando la teoría de Shockley sobre la capacidad de la región de transición de la unión PN ²⁰. Para el transistor bipolar $C_n(V_{BE}, T)$ puede ser escrita como,

$$C_n(V_{BE}, T) = C_S(T) \left(\frac{V_{DE}(T) - V_{BE}}{kT/q} - 1 \right) \exp(qV_{BE}/kT) \quad (12)$$

y

$$C_S(T) = C_S(T_r) \left(\frac{T}{T_r} \right)^2 \exp \left[\frac{qV_{G0}}{k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (13)$$

donde T_r es la temperatura de referencia y V_{G0} el voltaje de la banda prohibida extrapolado a cero Kelvin.

Basado en la ecuación (12) y la condición de capacidad máxima $dC_n/dV_{BE} = 0$, se encontró una relación importante entre $V_{BE_{máx}}$ y V_{DE} :

$$V_{BE_{máx}}(T) = V_{DE}(T) - \frac{2kT}{q} \quad (14)$$

Los valores medidos y simulados de C_e con este modelo se muestran en la figura 2 para dos temperaturas.

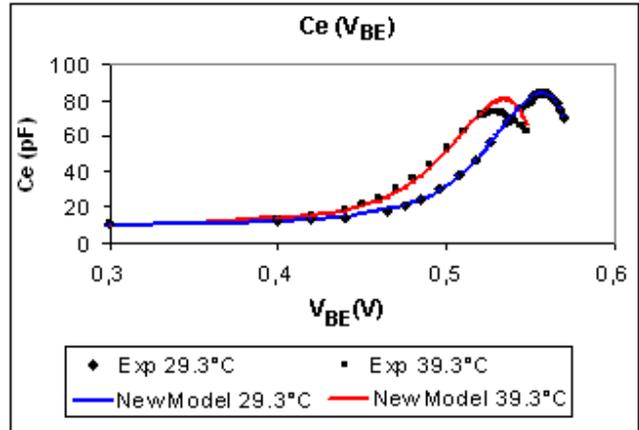


Figura 2. Valores experimentales y simulados de C_e para 29.3°C y 39.3°C

En la figura 2 se observa una concordancia excelente entre los resultados experimentales y simulados con el nuevo modelo a $T = 29.3^\circ\text{C}$, no solo en la región de crecimiento exponencial sino en la descripción del comportamiento asimétrico de C_e alrededor de $C_{e\text{máx}}$. El error de casi 8% en $C_{e\text{máx}}$ a 39.3°C en gran parte es debido al corrimiento de $\pm 5\%$ en tiempo y temperatura del puente capacitivo utilizado en la medición.

EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS CON LOS MODELOS ELABORADOS

La extracción de los parámetros físico tratados aquí se basa en las mediciones realizadas con la estación de medición presentada en la figura 3.

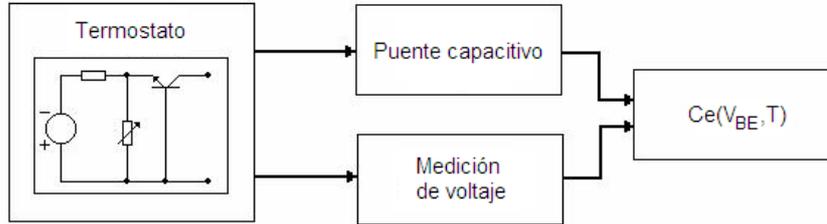


Figura 3. Estación de medición

El termostato Haake de baño líquido garantiza una estabilidad térmica mejor que 0.05°C . Las mediciones de corriente directa CD del voltaje V_{BE} se realizaron con un multímetro Agilent de 6 ½ dígitos. El error de medición de C_e en el puente (debido a la conductancia paralela del diodo base-emisor) es despreciable, excepto en la proximidad del valor máximo de C_e , donde este error es solo 2%. Razón por la cual no se han introducido correcciones en los valores experimentales de C_e .

EXTRACCIÓN DEL POTENCIAL DE CONTACTO $V_{DE}(T)$

La diferencia de potencial que existe en la unión PN en equilibrio, conocido como potencial de contacto, de difusión o “built in voltage” es un parámetro fundamental en el estudio teórico y modelación de la unión PN y de los dispositivos semiconductores. Está presente tanto en las expresiones teóricas de la capacidad de la carga espacial como en las expresiones de la capacidad del emisor de los modelos compactos^{2,4,8,15,22,23}. La determinación del valor de V_{DE} , siendo un parámetro de equilibrio, solo es posible de forma indirecta, a través de la medición de la capacidad de la unión correspondiente.

La extracción de los valores de $V_{DE}(T)$ se basa en la ecuación (14), utilizando los valores de $V_{BE\text{máx}}$ experimentalmente obtenidos con la estación de medición en el intervalo de temperatura de 30°C a 60°C , como se muestra en la figura 4.

Para comparar el comportamiento experimental y teórico de potencial de difusión con la temperatura, sus valores teóricos fueron calculados utilizando la ecuación (11) reportado por Schroter⁴, tomando como $V_{DE}(T_r)$ el valor experimental de $V_{DE}(T)$ de más baja temperatura de medición y el valor de $V_{G0} = 1,185$ V, reportado por Meijer²³ para el transistor MAT01. Los resultados se presentan en la figura 4.

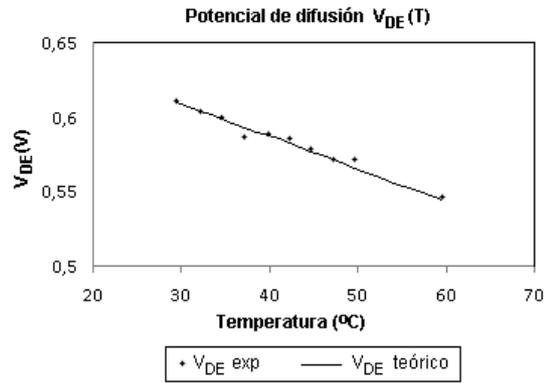


Figura 4. Variación del potencial de difusión vs temperatura

Los resultados muestran muy buena concordancia entre los resultados experimentales y teórico, con un error máximo menor que 2%, lo que valida el método de extracción de este parámetro y comprueba la ecuación (11) para describir el comportamiento del potencial de difusión con la temperatura.

EXTRACCIÓN DEL COEFICIENTE DE EMISIÓN

Para caracterizar el comportamiento del coeficiente de emisión $n(T)$ del transistor bipolar (polarizado con corriente de colector constante) se elaboró un procedimiento de simulación cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 5.

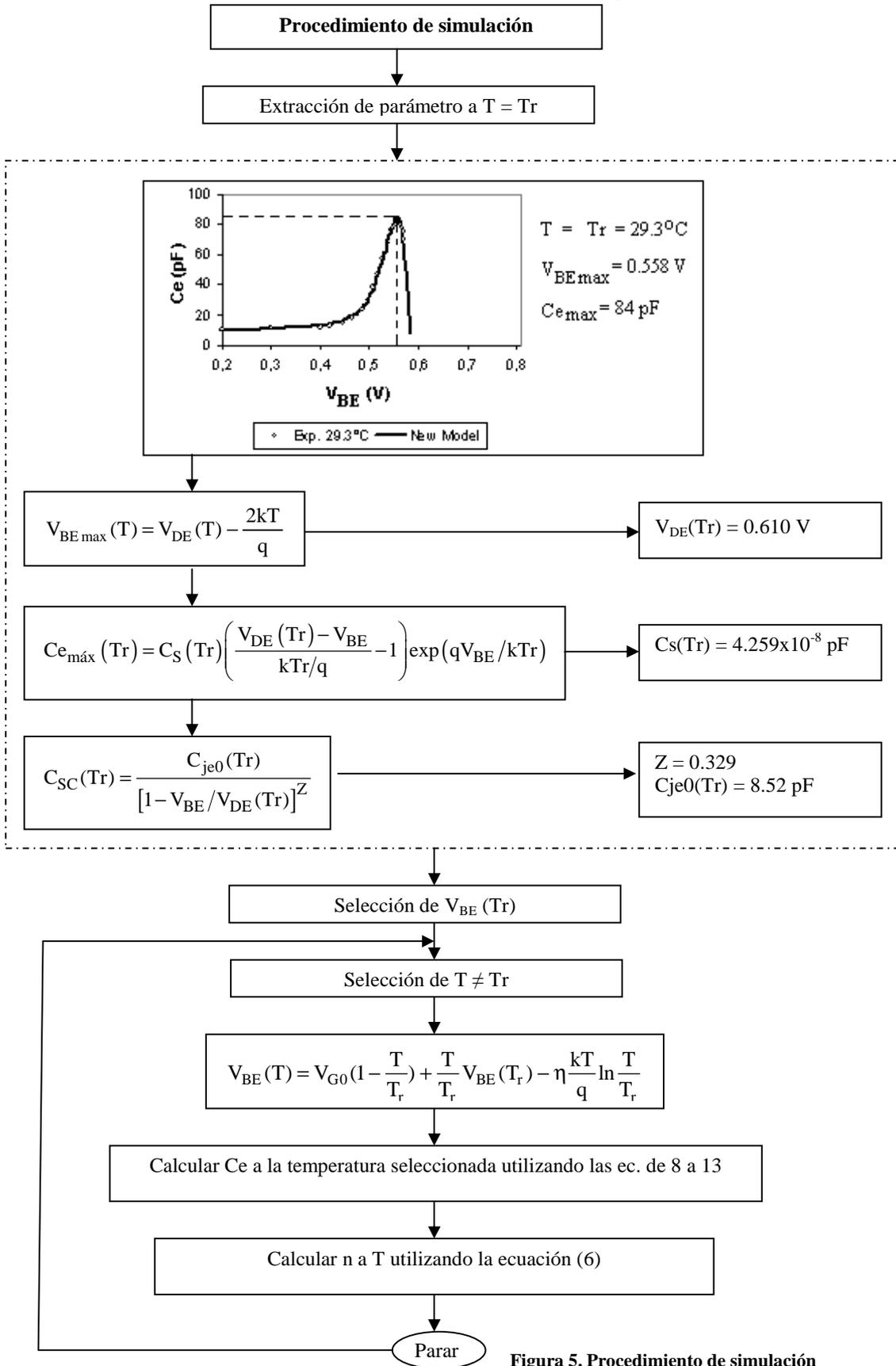


Figura 5. Procedimiento de simulación

Los resultados de simulación con transistores bipolares estándar MAT01 con $\eta = 3,54$ y $V_{G0} = 1,185$ V y transistores pnp verticales fabricados con tecnología CMOS de $0,5 \mu\text{m}$ con $\eta = 5,1$ y $V_{G0} = 1,12046$ V se muestran en las figuras 6 y 7 para dos niveles de polarización.

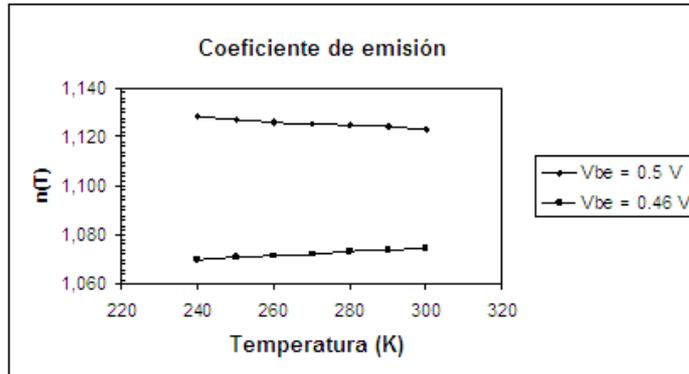


Figura 6. Variación de $n(T)$ del transistor bipolar estándar MAT01 con $\eta = 3,54$ y $V_{G0} = 1,185$ V

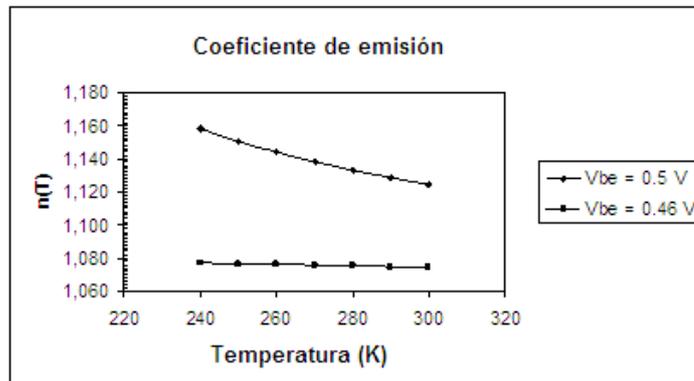


Figura 7. Variación de $n(T)$ del transistor vertical pnp en tecnología CMOS con $\eta = 5,1$ y $V_{G0} = 1,12046$ V

La sensibilidad de n con la temperatura está relacionada con el producto $Tc_e(T)$ como se puede observar de la ecuación (6), lo que implica también una dependencia del área del emisor. Los resultados de simulación muestran que el incremento de n a bajas temperaturas no solo depende de las condiciones de polarización, sino también de los parámetros tecnológicos η y V_{G0} .

ESTIMACIÓN DEL EFECTO DEL COEFICIENTE DE EMISIÓN

La estimación del efecto del coeficiente de emisión puede ser obtenida utilizando la aproximación lineal para $V_G(T) = V_{G0} - \alpha T$ en la ecuación (4) de $V_{BE}(T)$, resultando en:

$$V_{BE}(T) = n(T)V_{G0} \left(1 - \frac{T}{T_r} \right) + V_{BE}(T_r) \frac{T}{T_r} \left[\frac{n(T)}{n(T_r)} \right] - n(T)\eta \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{T}{T_r} \right] \quad (15)$$

donde $n(T)V_{G0} = V_{G0}'$ y $n(T)\eta = \eta'$ representan los valores de mejor ajuste para $V_{BE}(T)$, extraídos de mediciones experimentales. La ecuación (15) queda ahora modificada como

$$V_{BE}(T) = V_{G0} \left(1 - \frac{T}{T_r} \right) + V_{BE}(T_r) \frac{T}{T_r} \left[\frac{n(T)}{n(T_r)} \right] - \eta' \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{T}{T_r} \right] \quad (16)$$

El error $\Delta V_{BE}(T)$ introducido al despreciar la variación del coeficiente de emisión con la temperatura fue estimado para transistores npn fabricados con tecnología bipolar estándar y transistores pnp fabricados con tecnología CMOS de 0,5 μm , utilizando la ecuación (16). Los resultados se muestran en la tabla 1, donde la temperatura equivalente fue estimada considerando una variación típica de $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

Tabla 1. Valores calculados de $\Delta V_{BE}(T)$ y temperatura equivalente

Datos a $T_r=300\text{K}$ y $T=240\text{K}$						Resultados	
Tecnología	$V_{BE}(T_r)$ V	$n(T_r)$	$n(T)$	V_{G0}' V	η'	$\Delta V_{BE}(T)$ mV	T_{eq} $^\circ\text{C}$
NPN (Bipolar)	0.46	1.07496	1.07764	1.18500	3.54	1.711	0.855
	0.50	1.12459	1.15790	1.18500	3.54	10.40	5.2
PNP (CMOS)	0.46	1.07472	1.07003	1.12046	5.1	-1.606	0.803
	0.50	1.12344	1.12837	1.12046	5.1	1.756	0.878

Estos resultados indican la conveniencia de tener en cuenta la variación del coeficiente de emisión con la temperatura en el diseño de circuitos que se basan en el voltaje base-emisor $V_{BE}(T)$.

CONCLUSIONES

El trabajo presentado muestra que considerar el enfoque físico permite mejorar la modelación de parámetros del transistor bipolar con lo que brinda mayor exactitud en la simulación de su comportamiento.

A través del trabajo desarrollado se alcanzaron los siguientes resultados:

- Se obtuvo una nueva expresión de $V_{BE}(T)$ que incluye por primera vez el efecto del coeficiente de emisión $n(T)$ en el modelo del potencial base-emisor. La expresión obtenida permitió estimar el error que se comete al no considerar este parámetro.
- Se presentó un enfoque físico del comportamiento del coeficiente de emisión del emisor con la polarización directa y la temperatura a través de su dependencia con la capacidad del emisor C_e .
- Se obtuvo un nuevo modelo de la capacidad del emisor en función de V_{BE} y de la temperatura $C_e(V_{BE}, T)$, que incluye por primera vez la capacidad neutral.
- Se realizó la extracción del potencial de contacto $V_{DE}(T)$ que permitió comprobar la expresión teórica reportada.
- Se elaboró un procedimiento de simulación y se realizó la simulación de $n(T)$, enfocando su comportamiento a través de la variación de la capacidad del emisor, y se comprobó su influencia en el voltaje V_{BE} del transistor bipolar.

REFERENCIAS

1. SCHROTER M. "Compact bipolar transistor modeling - Issues and possible solutions", *Workshop on Compact Modeling*, 2003. February, San Francisco.
2. GETREU, Ian E. *Modeling the bipolar transistor*. New York: Elsevier. 1978.
3. GUMMEL H. K; POON H. C. "An Integral Charge Control Model of Bipolar Transistors", *BSTJ*, 1970 May-June pp. 827-852.
4. SCHROTER M. *HICUM. A scalable physics-based compact bipolar transistor model* [en línea]. [ref. de de octubre 2004]. Disponible en Web: http://www.iee.et.tu-dresden.de/iee/eb/comp_mod.html.
5. SCHROTER M; LEHMANN S; FREGONESE S; ZIMMER T. "A Computationally Efficient Physics-Based Compact Bipolar Transistor Model for Circuit Design—Part I: Model Formulation", *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2006, Vol. 53, No. 2, pp. 279-286.
6. SCHROTER M, TRAN H, "Regional Approach Methods for SiGe HBT compact modeling", *6th HICUM Workshop*, 2006, Heilbronn, June 12-13.

7. WCM - *Workshop on Compact Modeling*.htm, Feb. 24, 2014
8. PAASSCHENS J. C., KLOOSTERMAN W.J. "The Mextram Bipolar Transistor Model –Level 504". J. Nat. Lab. Unclassified Report, NL –UR 2000/811, Philips Nat.Lab. Last update October 2004.
9. MEXTRAM - *News*.htm [en línea] [ref. de june 2014]. Disponible en Web:http://mextram.ewi.tudelft.nl/page_News.php.
10. MCANDREW, C.C. et al, " VBIC95, The Vertical Bipolar Inter-Company Model", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1996, October, Vol. 31, No. 10, pp 1476-1483.
11. WANG G; MEIJER G. C. M. C. " The Temperature Characteristics of Bipolar Transistors Fabricated in CMOS Technology", *Sensors and Actuators*, 2000, 87, pp. 81-89.
12. TSIVIDIS Y. P. " Accurate analysis of temperature effects in I_C - V_{BE} characteristics with application to bandgap reference source", *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1980, Vol. Sc 5, No.6, pp. 1076.
13. VAN STAVEREN A; VERHOEVEN C. J. M; VAN ROERMUND A. H. M. " The Influence of the Reverse Early Effect on the Performance of Bandgap References", *IEEE Transactions on Circuits and Systems* , 1996, May, 1, 43(5), pp 418 -421.
14. MIJALKOVIC S, "Generalized Early Factor for Compact Modelling of Bipolar Transistors with non-uniform base", *Electronics Letters*, 2003, Nov, Vol. 39, No. 24.
15. POON H. C; GUMMEL H. K. " Modeling of emitter capacitance", in *Proc. IEEE*, Dec, 1969, 2181.
16. BOUMA B. C; ROELOFS A. C. " An experimental determination of the forward-bias emitter- base capacitance", *Solid-State Electronics*, vol. 21, pp. 833,
17. SCHROTER M; TRAN H. "Charge-Storage Related Parameter Calculation for Si and SiGe Bipolar Transistors from Device Simulation", *NSTI-Nanotech*, 2006, Vol. 3, pp. 735-740.
18. AMADOR R; NAGY A; ALVAREZ M; POLANCO A. "Critical discusión of emitter capacitance modelling (Poster)", *IX Workshop Iberchip 2003*, La Habana 24-27 de Marzo, 2003.
19. NAGY A, POLANCO, ALVAREZ M, " A New Bipolar Junction Transistor Base-Emitter Capacitance Model, " *Sensor Letters*, 2006 , Vol. 4, pp. 1–7.
20. SHOCKLEY W, "The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors", *Bell System Technical Journal*, 1949, Vol. 28, pp. 435-489.
21. NAGY A; POLANCO A; ALVAREZ M. " Nuevo Modelo de la capacidad de Emisor", *XI Convención Internacional INFORMÁTICA 2005*, La Habana, Mayo 2005.
22. SZE S. *Physics of Semiconductor Devices*, Toronto: Editorial John Willey and Sons, 1981.
23. MEIJER G. C. M. " Thermal sensors based on transistors", *Sensors and Actuators*, 1986, A 10, pp. 103-125.

AUTORES

Agnes S. Nagy – Profesora Auxiliar Consultante del Centro de Investigaciones en Microelectrónica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Titular de la ACC, agnes.nagy@electronica.cujae.edu.cu

Alicia Polanco Risquet– Investigadora Titular del Centro de Investigaciones en Microelectrónica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, alicia.polanco@electronica.cujae.edu.cu