

Optimización del modelo en pequeña señal del transistor bipolar de heterounión de SiGe para altas frecuencias y ruido

Aníbal U. Pacheco-Sánchez
M. César Enciso-Barrón
Luis M. Rodríguez-Mendez
Mauro A. Enciso-Aguilar

Departamento de Maestría en Ingeniería de Telecomunicaciones,
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco,
Instituto Politécnico Nacional.
Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos', Col. Lindavista,
CP 07738, México DF.
MÉXICO.

Tel. (+52) 55 5729 6000 ext. 54756
Correo electrónico (email): mauro.enciso@gmail.com
anibalverbeno@gmail.com

Recibido el 13 de octubre de 2009; aceptado el 26 de febrero de 2010.

1. Resumen

El rápido crecimiento de las tecnologías semiconductoras aplicadas a diferentes ramas de la ciencia ha propiciado que el diseño asistido por computadora de tecnologías (CAD, por sus siglas en inglés) se convierta en una parte fundamental del proceso de desarrollo de las mismas. En este trabajo se presenta el modelado de un *transistor bipolar de heterounión* de SiGe utilizando el enfoque de circuito eléctrico y el ajuste del mismo para las curvas de los parámetros de dispersión, comparándolas con resultados medidos en laboratorio. Así mismo, se presenta un estudio sobre el ruido del dispositivo.

Palabras clave: CAD, transistor bipolar de heterounión, SiGe, parámetros de dispersión, figuras de mérito de ruido.

2. Abstract (SiGe Heterojunction Bipolar Transistor Small-Signal Model Optimization for High Frequencies and Noises)

Semiconductor technologies applied to different branches of science have been growing rapidly, due to this, computer-aided

design (CAD) is now a critical step in the development process of these technologies. In this work, a SiGe Heterojunction Bipolar Transistor is modeling using an electrical approaching and adjusting it for the scattering parameters, comparing them with results obtained previously in lab. Also, a simulation study on the noise is presented.

Key words: CAD, heterojunction bipolar transistor, SiGe, scattering parameters, noise figures of merit.

3. Introducción

Los *transistores bipolares de heterounión* (TBH) de SiGe son dispositivos particularmente atractivos para la operación en altas frecuencias ya que, gracias a las características propias de la tecnología, presentan frecuencias de corte y de oscilación elevadas [1,2]; aunado a esto, su sencilla adaptación a la tecnología de Si, dominante en la industria de la electrónica, los hace unos dispositivos eficientes y menos costosos, en contraste con otras tecnologías (III-V) que ofrecen rapidez, a mayor precio. Las aplicaciones de los TBH de SiGe son principalmente en las industrias de la telefonía celular, redes ópticas, radares, y últimamente se han presentado resultados satisfactorios para su utilización en la industria criogénica [3].

Para tener un diseño eficiente en aplicaciones de alta velocidad se debe modelar adecuadamente el transistor, y determinar la incidencia que tiene cada uno de los componentes del modelo sobre el comportamiento del dispositivo en ruido y en altas frecuencias. Existen dos enfoques de modelado utilizados actualmente: el enfoque eléctrico y físico, los cuales pueden ser utilizados alternativamente o bien trabajar con ambos para tener un panorama completo de los mecanismos internos del dispositivo. Los resultados obtenidos al modelar TBHs de SiGe con el enfoque físico ya han sido presentados anteriormente [4], en este trabajo se utiliza el enfoque eléctrico para el modelado del dispositivo.

4. Desarrollo

4.1. Modelado eléctrico

Tradicionalmente, las características de la respuesta a altas frecuencias en los semiconductores, son modeladas utilizan-

do la aproximación por circuito equivalente, donde el comportamiento eléctrico del dispositivo en las terminales conectadas es representado por un circuito que consiste de elementos de dos terminales agrupados, con resistencia, capacitancia e inductancia ideales. En el enfoque por circuito equivalente basado en las propiedades físicas, el modelado de un dispositivo activo inicia con una selección de un modelo de circuito equivalente de elementos lineales o no lineales concentrados. Los elementos concentrados se relacionan con los mecanismos físicos en el dispositivo.

Para determinar los elementos lineales del transistor interno, se aplican procedimientos de extracción a las mediciones de parámetros S a pequeña señal. Los elementos no lineales pueden ser modelados por medio de funciones analíticas de voltajes del transistor interno.

En este trabajo se presenta la optimización del modelo de circuito equivalente a altas frecuencias de un TBH de SiGe que cuenta con un perfil de dopado gaussiano en base de valor máximo igual a 1.1×10^{19} átomos/cm³, concentración de Ge constante de un 20% y un espesor de base igual a 21 nm. Para esto, se comparan resultados de mediciones de laboratorio hechas con dicho dispositivo, con la respuesta que brinda el modelo propuesto y desarrollado en el programa Advanced Design System perteneciente a la familia Agilent Technologies.

4.1.1. Características del modelo utilizado

Existen diferentes modelos de circuito equivalente que se pueden utilizar para el TBH como lo son el modelo Ebers-Moll, modelo Gummel-Poon, modelo híbrido- π , modelo-T, entre otros [5]; para este trabajo se ha elegido el modelo híbrido- π a pequeña señal el cual es mostrado en la Fig. 1, la configuración utilizada es la de emisor común.

Cada uno de los parámetros presentados en el modelo está relacionado con los distintos mecanismos físicos internos del transistor y se encuentran respaldados por diferentes métodos teóricos para obtenerlos, como los citados en [6]. Dichos métodos de extracción pueden ser engorrosos y tardados, mientras que con el diseño asistido por computadora es más sencillo y toma menos tiempo el obtenerlos.

Los parámetros de dispersión de los dispositivos fueron medidos y previamente reportados en [1]. Los valores de los elementos del circuito equivalente obtenidos son: $R_1=20923 \Omega$, $R_2=0 \Omega$, $R_{b1}=163.5778 \Omega$, $R_e=3.104 \Omega$, $R_{cc}=5.7 \Omega$, $gm=0.03355$ siemens, $C_{pi}=19.0921$ fF, $XC_{jc}=0.52074$ fF, $C_{jc}=0.5786$ fF, $I_1=0.1647$ pA, $I_2=8.968$ pF, donde I_1 e I_2 son

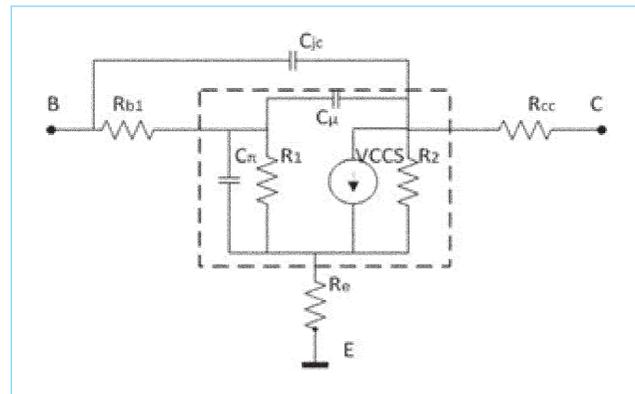


Fig. 1. Circuito eléctrico extrínseco equivalente a pequeña señal de un TBH de SiGe.

fuentes de ruido cuyos valores son obtenidos por las expresiones (1) y (2):

$$I_1 = \sqrt{2qI_b} \quad (1)$$

$$I_2 = \sqrt{2qI_c} \quad (2)$$

Donde q es la carga del electrón, $eI_b=84.65$ nA e $I_c=0.251$ mA se obtienen de las mediciones reportadas. La simulación se realizó en el margen de frecuencias de 1.5 GHz a 18.5 GHz con pasos de 500 MHz.

4.2. Ajuste de parámetros de dispersión

Los resultados analizados con el propósito de optimizar este modelo fueron los parámetros S propios del dispositivo, en

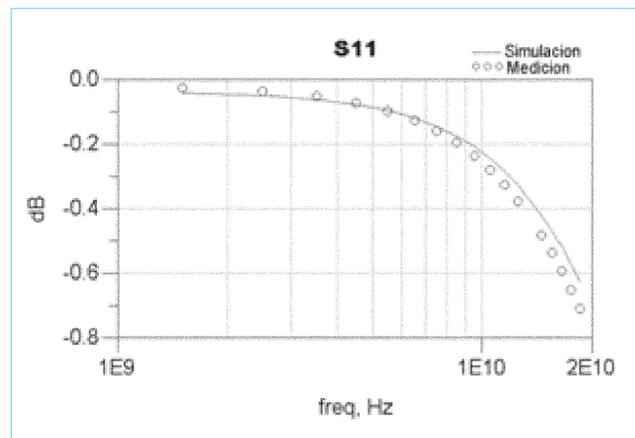


Fig. 2. Parámetro S11 medido y simulado antes del ajuste.

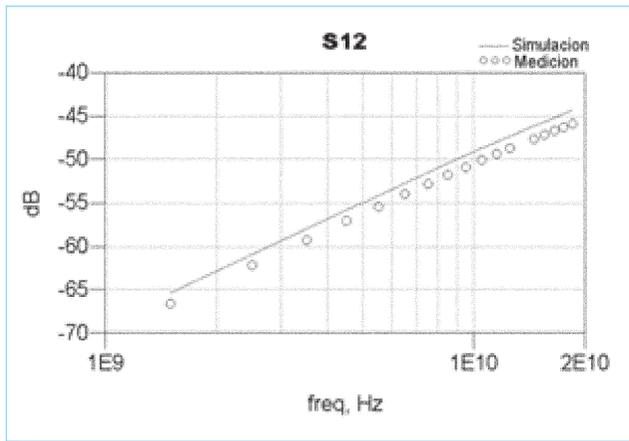


Fig. 3. Parámetro S12 medido y simulado antes del ajuste.

los cuales se observaba un buen comportamiento del modelo en prácticamente todo el margen de frecuencia de estudio, al menos en S11, S12 y S21, mientras que el parámetro S22 simulado presentaba una discrepancia considerable con respecto al medido, estos resultados se muestran en las figuras 2 hasta 5.

Al ser el coeficiente de reflexión de salida (S22) el parámetro que no concordaba, se realizaron procesos de optimización propios del programa utilizado (definiendo las metas que se deseen alcanzar), aplicándolos únicamente a los elementos que se encuentran a la salida del circuito (entre colector y emisor), pues son los que tienen incidencia en la variación

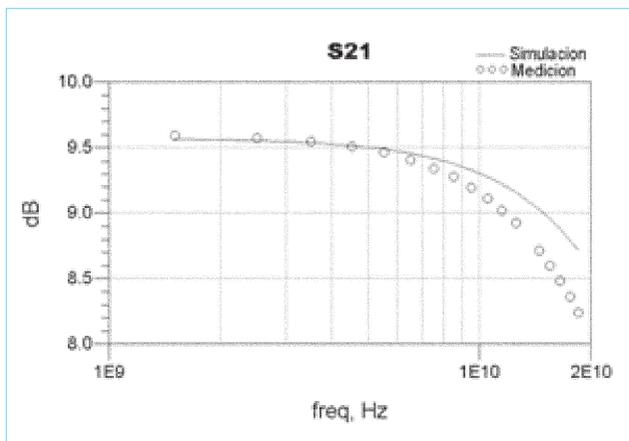


Fig. 4. Parámetro S21 medido y simulado antes del ajuste.

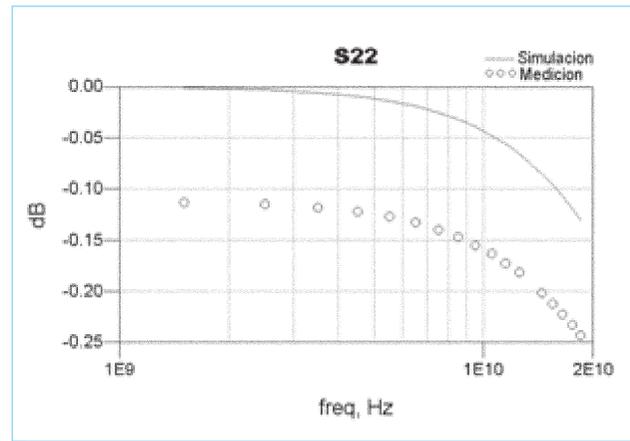


Fig. 5. Parámetro S22 medido y simulado antes del ajuste.

de dicho parámetro, llegando a la obtención de un nuevo valor en la resistencia R2 igual a 7 K Ω . Las gráficas de los parámetros S después de hacer este ajuste en el modelo se muestran en las Figs. 6 a 9.

El proceso de optimización utilizado por el software fue el llamado híbrido; la optimización híbrida es una combinación del método de búsqueda aleatorio con el método cuasi-newtoniano (ambos incluidos también en el software) y cuenta con dos propiedades importantes: utiliza la información del gradiente durante la optimización y es útil para encontrar un mínimo local, además de que tiene probabilidad de encontrar el mínimo global.

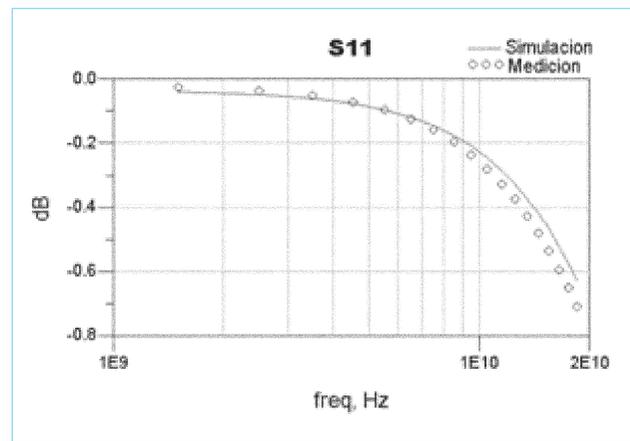


Fig. 6. Parámetro S11 medido y simulado después del ajuste.

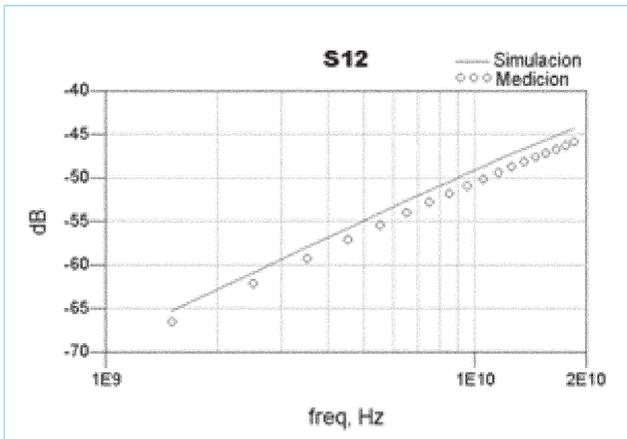


Fig. 7. Parámetro S12 medido y simulado después del ajuste.

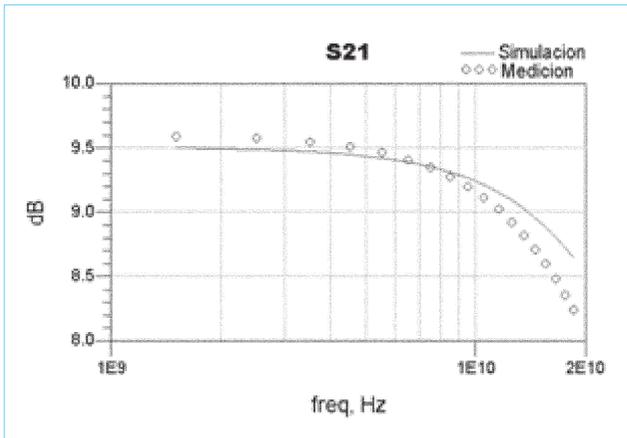


Fig. 8. Parámetro S21 medido y simulado después del ajuste.

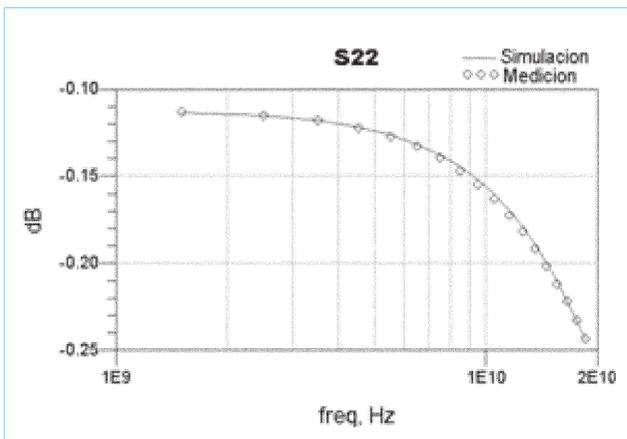


Fig. 9. Parámetro S22 medido y simulado después del ajuste.

Se puede apreciar que la curva del coeficiente de reflexión de salida simulado se ajusta perfectamente a las mediciones reportadas, mientras que los demás coeficientes no se ven afectados significativamente por el ajuste realizado.

4.3. Figuras de mérito de ruido en altas frecuencias

Cualquier red de dos puertos tiene asociada una figura de ruido definida por:

$$F = F_{\min} + 4 \frac{R_n}{Z_0} \frac{|\Gamma_s - \Gamma_{opt}|^2}{|1 + \Gamma_{opt}|^2 (1 - \Gamma_s - |\Gamma_{opt}|^2)} \quad (3)$$

De la cual se desprenden las cuatro figuras de mérito (FoM) de ruido:

- Mínima figura de ruido, F_{\min} .
- Parte real y parte imaginaria del coeficiente de reflexión óptimo, Γ_{opt} .
- Resistencia equivalente de ruido, R_n .

Al graficar la ecuación (3) se obtiene un paraboloide sobre el plano complejo, donde Γ_{opt} indica el punto donde estará el vértice del paraboloide, F_{\min} es la mínima figura de ruido presente en el dispositivo y R_n indica la apertura del paraboloide, mientras más pequeño sea el valor de R_n , más abierto estará el paraboloide y por lo tanto, el dispositivo será menos selectivo.

Para tener un buen diseño para aplicaciones en las que el ruido sea un tópico importante, deben de reportarse estas figuras de mérito, de nada sirve tener sólo una, pues no refleja el comportamiento total del dispositivo. Las figuras de mérito de ruido para este transistor se presentan en las figuras 10 a 12.

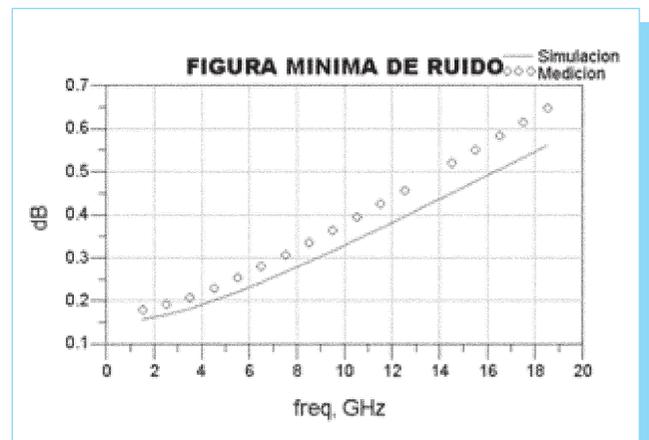


Fig. 10. Figura mínima de ruido.

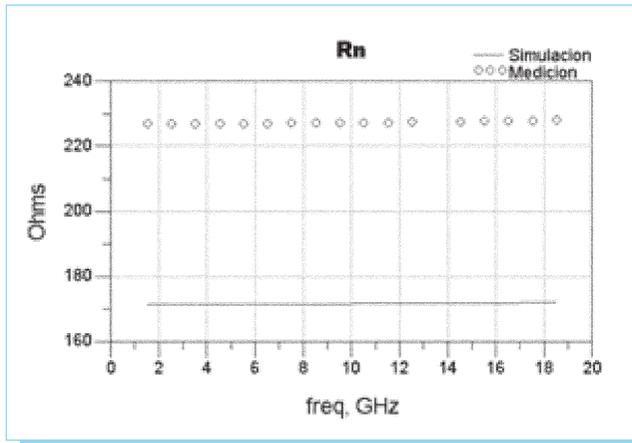


Fig. 11. Resistencia equivalente de ruido.

La figura mínima de ruido y la magnitud del coeficiente de reflexión óptimo simulados concuerdan con los reportados en la medición, mientras que la resistencia equivalente de ruido presenta una discrepancia considerable, una opción para mejorar ésta situación, sería realizar el análisis de este transistor desde el enfoque físico de modelado, mediante la solución de las ecuaciones de Langevin de transporte empleando funciones locales de Green. Ésta aproximación es conocida como el método de campo de impedancias y constituye el siguiente paso en este trabajo de investigación.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta la optimización realizada del modelo híbrido- π del transistor bipolar de SiGe, logrando con ello, describir el comportamiento del dispositivo a altas frecuencias a través de los parámetros de dispersión.

El diseño asistido por computadora es una herramienta que en la actualidad permite obtener la descripción del comportamiento real de un dispositivo en mucho menos tiempo que con los métodos teóricos de extracción de parámetros. En este caso se utilizó el programa ADS de Agilent Technologies, logrando un resultado satisfactorio.

Este trabajo pretende ser una guía al momento de diseñar posteriores dispositivos TBH, pues se comprobó que los resultados arrojados por el modelo son equiparables a los resultados de las mediciones. Los resultados obtenidos muestran que un estudio fundamental que involucre a la física del transporte electrónico del dispositivo es necesario para reproducir correctamente las propiedades de ruido del transis-

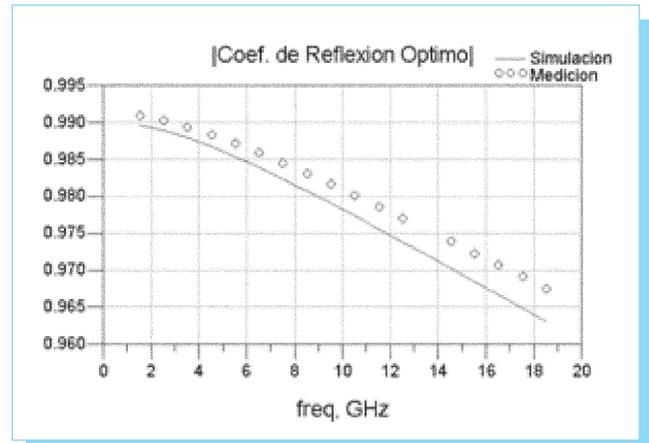


Fig. 12. Magnitud del coeficiente de reflexión óptimo.

tor. El método de campo de impedancias se encuentra bien perfilado para cumplir esta tarea.

Agradecimiento

El apoyo otorgado por COFAA-IPN y los proyectos SIP-IPN 20090575 y CONACYT 106698 es ampliamente agradecido.

6. Referencias

- [1] N. Zerounian, F. Aniel, B. Barbalat, P. Chevalier, A. Chantre, "500 GHz cut-off frequency SiGe HBTs", *IET Electron Lett* 2007;43;1076-8.
- [2] N. Zerounian, E. Ramírez-García, F. Aniel, P. Chevallier, B. Geynet, A. Chantre, "SiGe HBT featuring $f_t > 600$ GHz at cryogenic temperature", Presentado en *International SiGe & Ge: materials, processing, and device symposium of the joint international meeting of the 214th meeting of ECS*, 2008.
- [3] E. Ramírez-García *et al.*, "SiGe heterojunction bipolar transistor issues towards high cryogenic performances", *Cryogenics*, 2008.
- [4] A. Pacheco-Sánchez, M. Enciso-Aguilar, "High Frequency Noise Analysis of SiGe Heterojunction Bipolar Transistor", Presentado en el *Quinto Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, México, 2008.
- [5] P. Ashburn, *SiGe Heterojunction Bipolar Transistors*, Wiley & Sons, 2003.
- [6] F. Jun, "Small-signal model parameter extraction for microwave SiGe HBTs based on Y- and Z- parameter characterization", *Journal of Semiconductors*, Vol. 30, No. 8, Agosto 2009.