

MODELIZACIÓN MONTE CARLO DE HBTs ABRUPTOS DE InP/InGaAs

Pau Garcias-Salvà, Juan M. López-González, Lluís Prat

Departament d'Enginyeria Electrònica. Universitat Politècnica de Catalunya
C/ Jordi Girona 1-3. Campus Nord, mòdul C4. 08034 Barcelona
paugs@eel.upc.es

RESUMEN

En este trabajo se describe un modelo de simulación para transistores bipolares de heterounión abrupta basado en Monte Carlo, que integra de forma autoconsistente la resolución de la ecuación de Schrödinger en la interfaz emisor-base. La inclusión de esta última ecuación es necesaria para calcular el transporte de electrones a través de esta interfaz. Los resultados $I_C(V_{BE})$ y $I_B(V_{BE})$ se ajustan muy bien a los experimentales. Este modelo demuestra que las aproximaciones del transporte por arrastre y difusión no son válidas ni en la base ni en la unión base-colector.

1. INTRODUCCIÓN

Los transistores bipolares de heterounión basados en InP están llamados a jugar un papel muy importante en aplicaciones tales como telefonía celular, comunicaciones por satélite y comunicación de datos por fibra óptica [1], debido a su velocidad de operación, potencia de salida y baja tensión de alimentación.

Algunos de estos dispositivos presentan una transición abrupta de material entre el emisor y la base, presentando una discontinuidad en forma de pico en el nivel E_c de su diagrama de bandas de energía en la interfaz base-emisor. Los electrones que el emisor inyecta a la base deben superar o "tunelar" esta barrera de potencial, lo cual invalida los modelos tradicionales de transporte de portadores por arrastre y difusión. Por otra parte, los electrones inyectados en la base presentan una velocidad muy alta debido a la conversión de energía potencial en energía cinética al atravesar la interfaz emisor-base por cuyo motivo el modelo convencional de difusión en la base tampoco es válido.

En este trabajo se presenta una modelización de estos transistores basado en el método Monte Carlo que permite superar las limitaciones de los modelos convencionales. El transporte a través de la discontinuidad del nivel E_c en la discontinuidad emisor-base exige la resolución de la ecuación de Schrödinger para analizar la reflexión y transmisión cuánticas a través de este pico de energía potencial, lo cual no suele considerarse en los modelos Monte Carlo de dispositivos. Por este motivo hay que desarrollar un Monte Carlo específico para estos transistores que integre de forma autoconsistente la resolución de la ecuación de Schrödinger con el procedimiento general de este método [2].

2. MÉTODO MONTE CARLO PARA HBTs ABRUPTOS

La simulación Monte Carlo de estos dispositivos se inicia con la lectura de una solución aproximada, obtenida por otros modelos más simples, basados en arrastre y difusión, que proporciona una distribución inicial de electrones y huecos y de los niveles de energía del diagrama de bandas del dispositivo en la polarización elegida. A continuación empieza un procedimiento iterativo que contiene distintos bloques de cálculo.

El primer bloque se dedica a calcular el coeficiente de transmisión de electrones en la interfaz base-emisor resolviendo la ecuación de Schrödinger en esta región, teniendo en cuenta la energía total del electrón y el perfil de E_c , que se actualiza en cada iteración. Cuando un electrón cruza la heterounión o colisiona contra la barrera, es transmitido o reflejado a su región original según el resultado de comparar el valor de un número aleatorio generado en el intervalo (0,1) con el coeficiente de transmisión cuántico: si el número aleatorio es más pequeño el electrón es transmitido; si es más grande es reflejado.

Los dos siguientes bloques calculan la dinámica del electrón (vuelo libre y dispersión) y la distribución de partículas a lo largo del dispositivo por el procedimiento convencional de Monte Carlo. Como en un transistor bipolar la corriente de base depende de la distribución de huecos, se dedica el siguiente módulo al cálculo de la distribución de estos portadores, cálculo que no es habitual en la simulación Monte Carlo de dispositivos unipolares. Con el objetivo de reducir el tiempo de computación y teniendo en cuenta que los huecos no sufren fenómenos balísticos en este dispositivo, se utiliza un modelo basado en arrastre y difusión para dicho cálculo. Finalmente se calcula la densidad de carga en cada nodo y se resuelve la ecuación de Poisson, actualizando de este modo el diagrama de bandas del dispositivo.

Cuando el procedimiento de cálculo converge se calculan magnitudes de interés tales como los valores medios de la energía cinética del electrón y de su velocidad longitudinal, la recombinación en cada nodo y las corrientes de colector y base. Mediante este procedimiento de cálculo las únicas aproximaciones realizadas son las implícitas en el método Monte Carlo, es decir, las de la ecuación semiclásica de transporte de Boltzmann.

3. RESULTADOS

En la figura 1 se representan las densidades de corriente de colector y base obtenidas con este procedimiento al simular un HBT de InP/InGaAs cuyas características y medidas experimentales han sido publicadas [3]. Como puede observarse, el ajuste entre los valores experimentales y los simulados es excelente para tensiones superiores a 0.65 V. Para tensiones menores el ajuste no es tan bueno. Esta discrepancia la atribuimos al mayor nivel de ruido estadístico originado por la pequeña cantidad de electrones que circulan por el dispositivo en estas condiciones, ya que esta cantidad tiene una dependencia exponencial con la tensión aplicada. Conseguir resultados más precisos requeriría tiempos de simulación y memoria mucho mayores.

La simulación MC también proporciona la distribución de velocidades de los electrones en los distintos puntos del dispositivo. En un punto de la base próximo a la interfaz con el emisor, se observa un grupo importante de electrones con una velocidad longitudinal del orden de 10^8 cm/s en sentido emisor a colector que corresponde a los electrones inyectados por el emisor en la base (véase la figura 2). Esta distribución de velocidades confirma que el modelo de arrastre y difusión convencional, que supone implícitamente una distribución de velocidades próxima a la de equilibrio térmico, no puede aplicarse a estos dispositivos.

Otro resultado de la simulación es la velocidad media de los electrones a lo largo del dispositivo que se representa en la figura 3. Esta distribución presenta un pico de $7 \cdot 10^7$ cm/s en un punto de la zona de carga espacial de la unión colector. Este valor indica que los efectos de "overshoot velocity" son también muy importantes en este dispositivo, por lo que la aproximación estacionaria de considerar que la velocidad máxima de los electrones es la de saturación ($0.8 \cdot 10^7$ cm/s para InGaAs) tampoco puede utilizarse.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con el simulador Monte Carlo descrito presentan un ajuste satisfactorio con los resultados experimentales. El análisis de la velocidad de los electrones proporcionada por este modelo muestra que no es correcto el uso del modelo de arrastre y difusión para estos transistores.

5. REFERENCIAS

- [1] Kobayashi K.W., Oki A.K. and Streit D.C. "Indium phosphide HBT technology for future telecommunications applications", *Microw. J.* vol 42, no 7, p 74, 1999
- [2] Garcias-Salvà P., López-González J.M. and Prat L., "Effects of the emitter-base effective-mass difference on the collector current in InP/InGaAs HBTs. A Monte Carlo study". *Microelectronic Engineering*, Vol. 51-52, pp. 415-424, 2000
- [3] Nottenburg Y, Chen K, *et al.* "Hot-electron InGaAs/InP heterostructure bipolar transistor with fT of 110 GHz" *IEEE Electron Device Lett.* vol 10, p 30, 1989

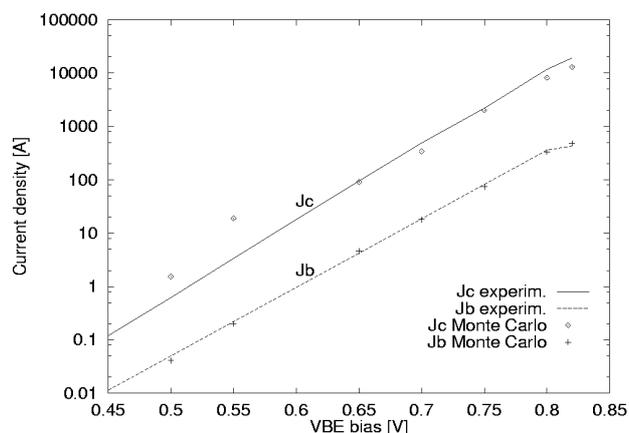


Figura 1. Características J_C (V_{BE}) y J_B (V_{CE}). Comparación de valores simulados y valores experimentales.

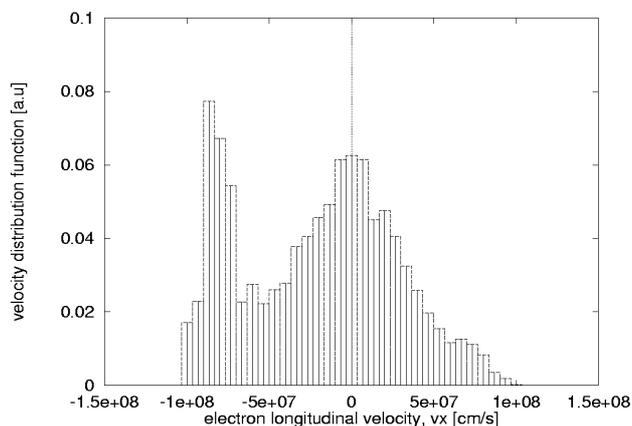


Figura 2. Distribución de la velocidad de los electrones en un punto de la base próximo al emisor.

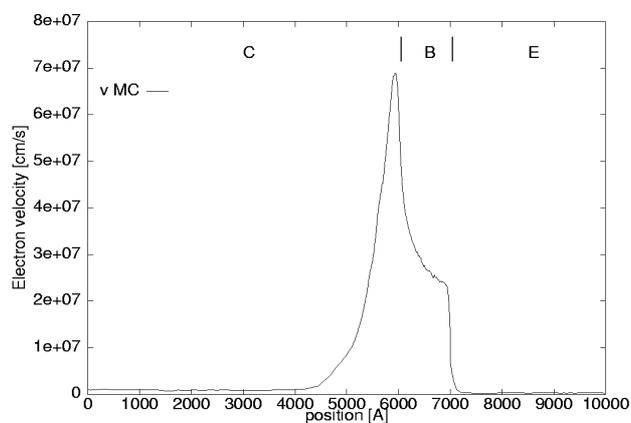


Figura 3. Velocidad longitudinal media de los electrones a lo largo del dispositivo.