

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

*Departament d'Enginyeria Electrònica*

**SIMULACIÓ MONTE CARLO DE  
TRANSISTORES BIPOLARES DE  
HETEROUNIÓ ABRUPTA (HBT)**

Autor: Pau Garcias Salvà  
Director: Lluís Prat Viñas

## 7. Conclusiones

Se ha desarrollado un simulador Monte Carlo, MCHBT, para transistores bipolares BJT y HBT que resuelve de forma exacta la ecuación de transporte de Boltzmann (BTE). Este modelo de simulación supera las limitaciones intrínsecas de otros modelos más simples (modelo hidrodinámico y modelo de arrastre-difusión), que se basan en diversas aproximaciones de la BTE.

El simulador desarrollado es computacionalmente eficiente gracias a la utilización de tres estrategias: a) la utilización de una buena aproximación inicial, que se obtiene a partir del simulador HBTSIM (basado en arrastre-difusión extendido); b) la utilización de técnicas de paralelismo y supercomputación; y c) el desarrollo de un esquema MC ponderado (WMC) que permite adecuar el número de partículas simulado en las distintas regiones del dispositivo con el fin de obtener buenos resultados estadísticos sin incrementar excesivamente el número total de partículas de la simulación ni, en consecuencia, el tiempo de computación.

El simulador MC ha sido aplicado al análisis de transistores bipolares de GaAs. Los resultados obtenidos han sido comparados con los de otros simuladores convencionales basados en arrastre-difusión. Dicha comparación valida el simulador MC desarrollado. Además, se ha utilizado la ecuación de balance del momento para interpretar los

resultados obtenidos con el simulador MC, lo cual ha permitido discutir cuantitativamente la validez de los modelos de arrastre-difusión en transistores bipolares.

Se ha ampliado el simulador MC de transistores bipolares de homounión con la resolución numérica exacta de la ecuación de Schrödinger en la región interfacial de la heterounión, para permitir así la simulación de HBTs abruptos (simulador MCHBT). La inclusión de este elemento de cálculo se ha hecho de forma consistente con el resto de procedimientos incluidos en el algoritmo MC (ciclos iterativos de dinámica MC de los electrones, ecuación de Poisson, continuidad de huecos y ecuación de Schrödinger).

El simulador MCHBT ha sido utilizado para analizar la corriente a través de la heterounión abrupta de HBTs de InP/InGaAs, que presentan una barrera en forma de pico (o *spike*) en el nivel  $E_c$ . En la transmisión de electrones a través de esta heterounión se han tenido en cuenta los efectos de no parabolicidad de las bandas y de la energía transversal del electrón sobre el coeficiente de transmisión/reflexión cuánticos, así como en el estado final del electrón. Los resultados obtenidos han sido contrastados con aquellos basados en las aproximaciones habituales (modelo de Grinberg). Se han observado discrepancias significativas en la corriente interfacial predicha por ambos modelos, se han analizado las causas y se han puesto de manifiesto las limitaciones de estos modelos aproximados.

Los resultados del simulador MCHBT referentes a la región de base han sido interpretados con ayuda de la ecuación de balance del momento. Este análisis pone de manifiesto que los electrones que constituyen la corriente en esta región son muy energéticos (*hot electrons*) y, en consecuencia, las ecuaciones convencionales de arrastre-difusión no son válidas para modelar dicho transporte. El transporte de estos electrones energéticos a través de la base responde a una combinación de dos mecanismos: un transporte por difusión  $q \cdot D_n \cdot dn/dx$  con una constante  $D_n = \mu_n \cdot (k_B \cdot T / q)$  y un transporte a una velocidad térmica  $q \cdot n \cdot (k_B \cdot T / 2 \cdot m^*)^{1/2}$ . A bajos niveles de corriente domina el primer mecanismo, mientras que para niveles altos de corriente el comportamiento tiende asintóticamente al del segundo mecanismo.