

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ И ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ГЕТЕРОБИПОЛЯРНЫХ СУБМИКРОННЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Проведен анализ моделей и тепловых режимов гетеробиполярных субмикронных транзисторов, представленных в виде простых аналитических и аппроксимационных процедур. Приведены характеристики и сравнены результаты моделирования с экспериментальными результатами для выбранных транзисторных структур. Математические модели транзисторов с такими характеристиками могут использоваться в пакетах программ схемотехнического проектирования.

The models and thermal conditions of heterojunction bipolar submicron transistors described in analytic and approximate forms were analysed. Characteristics of simulation are represented and experimental results for this transistors are compared. Mathematical models of these transistors can be used in circuit simulation.

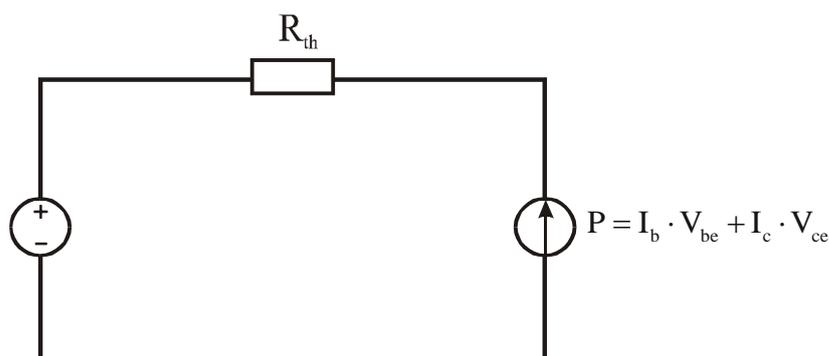
Введение

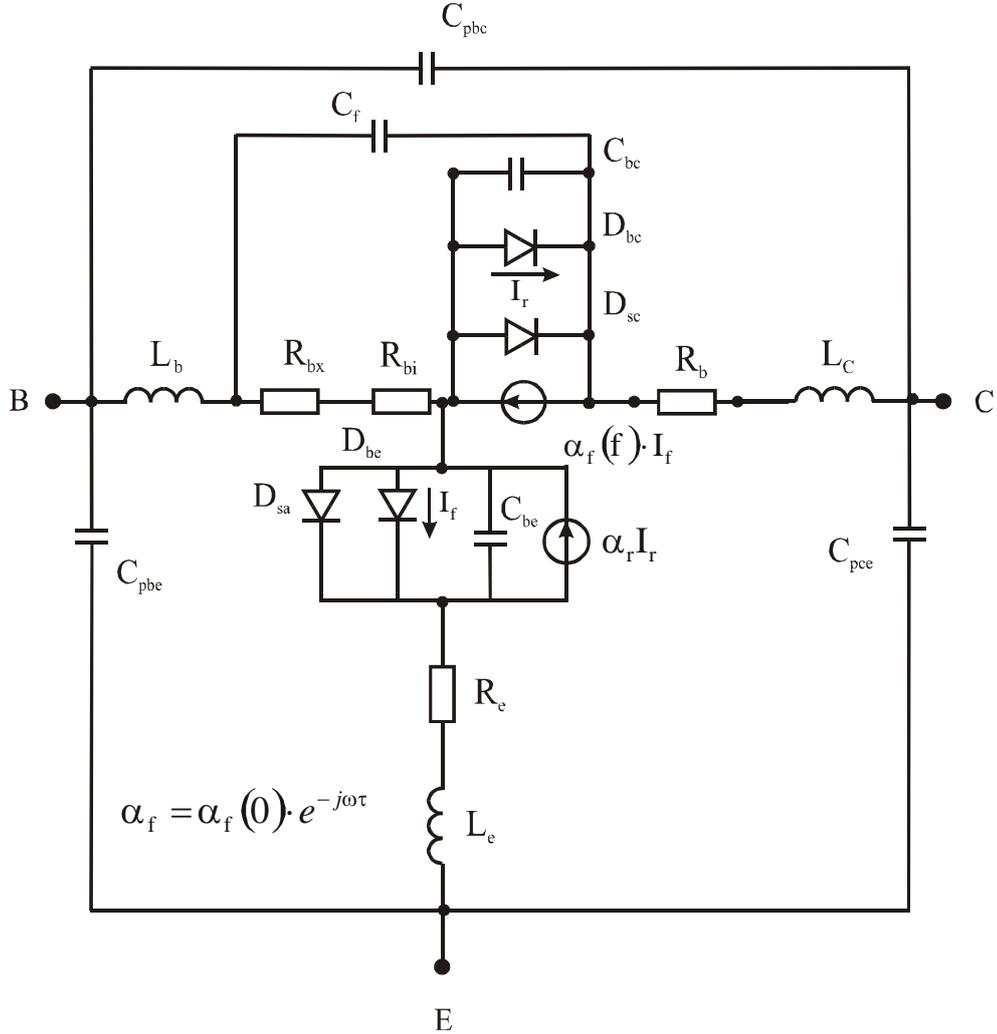
В связи с развитием высокоскоростных систем обработки информации актуальным становится применение функциональных узлов (ФУ) с рабочими характеристиками, лежащими в СВЧ диапазоне. На сегодняшний день получили широкое применение в качестве базовых элементов для таких ФУ гетеробиполярные транзисторы (heterojunction bipolar transistors – HBT). HBT используются в усилительных блоках, генераторах и смесителях [1] – [2], а также в системах передачи информации таких как беспроводные линии связи, высокоскоростные аналоговые и цифровые схемы и в оптоэлектронных устройствах [3].

По мере развития компонентной базы полупроводниковых приборов, в частности гетеробиполярных биполярных транзисторов, обладающих уникальными характеристиками по быстродействию на СВЧ, к транзисторным структурам предъявляются все более жесткие требования, особенно при больших уровнях сигнала.

В транзисторных структурах, работающих в режиме большого сигнала при некоторых значениях питающих напряжений имеет место саморазогрев и, как следствие, повышение температуры в активной области транзистора. Это приводит к изменению электрических параметров HBT.

Существует несколько подходов, учитывающих эффект саморазогрева [4]–[8]. Эти методы содержат сложный анализ взаимосвязи между электрическими и тепловыми полями. В этих работах эффект саморазогрева учитывался следующим образом: отдельно проводился анализ электрической и тепловой моделей HBT, приведенных на рис.1, а затем проводился





анализ взаимосвязи между этими моделями.

Рис.1. Схемная модель Эберса-Молла гетеробиполярного транзистора

Температура устройства рассчитывалась следующим образом:

$$T = T_0 + \Delta T = T_0 + R_{th} \cdot P_{DC}$$

$$P_{DC} = I_B V_{BE} + I_C V_{CE}$$

где T (°C)– температура устройства;

T_0 (°C)– внешняя температура;

P_{DC} (Вт)– рассеиваемая мощность устройства.

R_{th} (К/Вт)– тепловое сопротивление устройства, описываемое уравнением:

$$R_{th} = \frac{\Delta V_{BE}}{\phi \cdot P_{DC}}$$

где ϕ – коэффициент, учитывающий изменение V_{BE} при изменении температуры.

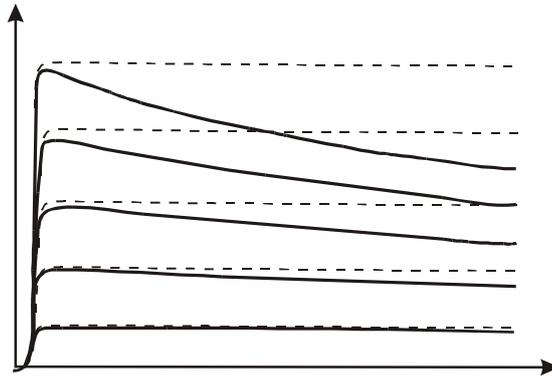


Рис.2. Выходные характеристики GaAs HBT с учетом и без учета саморазогрева

В работе [3] предложена упрощенная аналитическая модель HBT в режиме большого сигнала, учитывающая эффект саморазогрева. Эта модель подобна моделям HBT, исследуемым в работах [4]–[8]. Но в отличие от рассмотренных подходов эффект саморазогрева учитывался путем введения обратной связи (ОС) от коллектора к базе и источника тока, управляемого напряжением (ИТУН) (см. рис.). Введенная ОС уменьшает эффективное значение напряжения база эмиттер (U_{be}), что, в свою очередь, приводит к снижению тока коллектора (I_C). Глубина ОС зависит от теплового сопротивления структуры транзистора (R_{th}), а также от изменений напряжения база-эмиттер (U_{be}) с изменением температуры перехода база-эмиттер при фиксированном значении тока коллектора. В модели это учтено введением сопротивлений R_1 и R_2 . Отношение этих двух сопротивлений связано с глубиной ОС от коллектора к базе:

$$\frac{R_1}{R_2} = \phi \cdot R_{th}$$

где ϕ – коэффициент, учитывающий изменения U_{be} при изменении температуры перехода база-эмиттер.

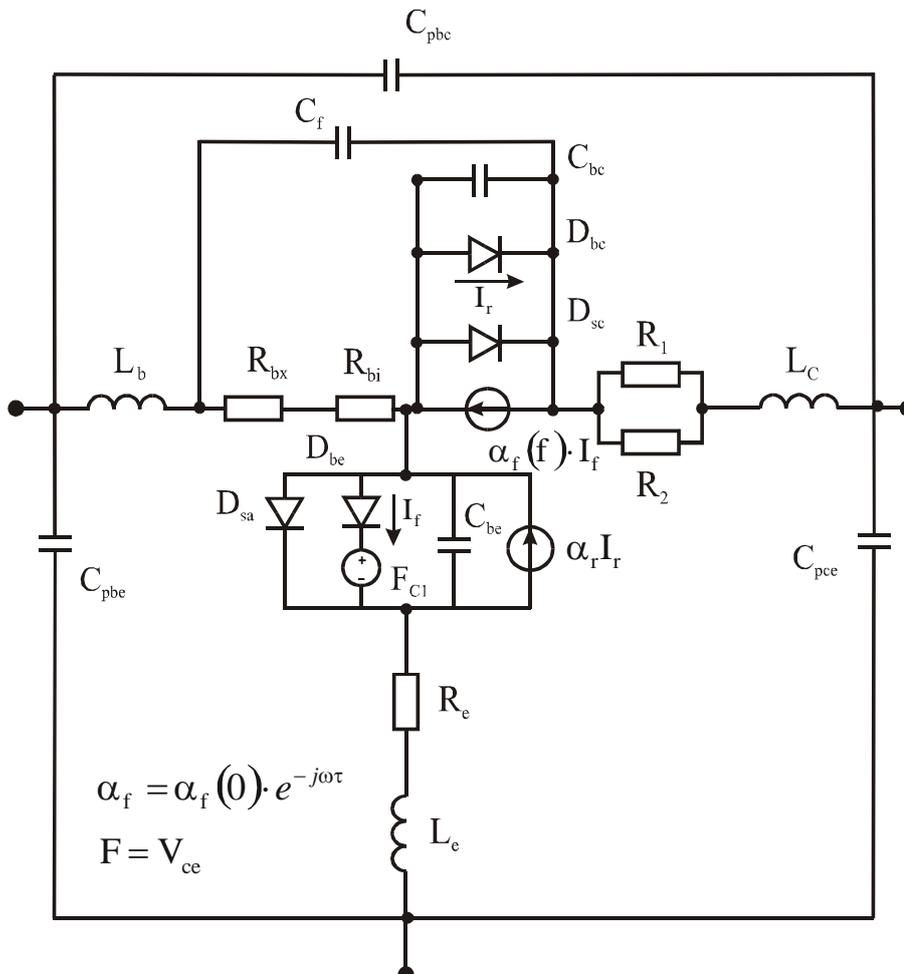


Рис.3. Схемная модель гетеробиполярного транзистора в режиме большого сигнала

Таким образом, аналитические выражения токов коллектора, баз и эмиттера с учетом эффекта саморазогрева будут иметь следующий вид:

$$I_c = \alpha_f \cdot I_{be} \cdot \left[e^{\left(\frac{qU_{be}'}{n_f kT} \right)} - 1 \right] - I_{bc} \cdot \left[e^{\left(\frac{qU_{bc}'}{n_r kT} \right)} - 1 \right] - I_{se} \cdot \left[e^{\left(\frac{qU_{bc}'}{n_{sc} kT} \right)} - 1 \right] \quad (1)$$

$$I_b = I_{sc} \cdot \left[e^{\left(\frac{qU_{bc}'}{n_{sc} kT} \right)} - 1 \right] + I_{se} \cdot \left[e^{\left(\frac{qU_{be}'}{n_{se} kT} \right)} - 1 \right] - (1 - \alpha_r) \cdot I_{bc} \cdot \left[e^{\left(\frac{qU_{bc}'}{n_r kT} \right)} - 1 \right] \quad (2)$$

$$I_e = I_{be}^M \cdot \left[e^{\left(\frac{qU_{be}'}{n_f kT} \right)} - 1 \right] - I_{se} \cdot \left[e^{\left(\frac{qU_{be}'}{n_{se} kT} \right)} - 1 \right] - \alpha_r \cdot I_{bc}^M \cdot \left[e^{\left(\frac{qU_{bc}'}{n_r kT} \right)} - 1 \right] \quad (3)$$

где U_{be}' и U_{bc}' – внутренние напряжения переходов база-эмиттер и база-коллектор, которые вычисляются по формулам:

$$U_{be}' = U_{be} - I_e R_e - I_b R_b \quad (4)$$

$$U_{bc}' = U_{bc} - I_c R_c - I_b R_b \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в выражения (1)–(2), получаем следующие выражения для токов коллектора, базы и эмиттера, соответственно:

$$I_c = \alpha_f \cdot I_{be} \cdot \left[e^{\left(\frac{q(U_{be} - I_e R_e - I_b R_b)}{n_f kT} \right)} - 1 \right] - I_{bc} \cdot \left[e^{\left(\frac{q(U_{bc} - I_c R_c - I_b R_b)}{n_r kT} \right)} - 1 \right] - I_{se} \cdot \left[e^{\left(\frac{q(U_{bc} - I_c R_c - I_b R_b)}{n_{sc} kT} \right)} - 1 \right]$$

$$I_b = I_{sc} \cdot \left[e^{\left(\frac{q(U_{bc} - I_c R_c - I_b R_b)}{n_{sc} kT} \right)} - 1 \right] + I_{se} \cdot \left[e^{\left(\frac{q(U_{be} - I_e R_e - I_b R_b)}{n_{se} kT} \right)} - 1 \right] - (1 - \alpha_r) \cdot I_{bc} \cdot \left[e^{\left(\frac{q(U_{bc} - I_c R_c - I_b R_b)}{n_r kT} \right)} - 1 \right]$$

$$I_e = I_{be}^M \cdot \left[e^{\left(\frac{q(U_{be} - I_e R_e - I_b R_b)}{n_f kT} \right)} - 1 \right] - I_{se} \cdot \left[e^{\left(\frac{q(U_{be} - I_e R_e - I_b R_b)}{n_{se} kT} \right)} - 1 \right] - \alpha_r \cdot I_{bc}^M \cdot \left[e^{\left(\frac{q(U_{bc} - I_c R_c - I_b R_b)}{n_r kT} \right)} - 1 \right]$$

где $\alpha_f = 0.95$ – постоянное значение коэффициента переноса;

$q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана;

$n_f = 1.035$ – коэффициент идеальности прямого тока;

$n_r = 1.2$ – ;

$n_{sc} = 1.5$ – ;

$n_{se} = 1.4812$ – коэффициент утечки база-эмиттер;

$T = 27$ °С – ** температура;

$I_{be} = 1.429 \cdot 10^{-23}$ А – прямой ток насыщения;

$I_{se} = 9.0125 \cdot 10^{-19}$ А – обратный ток утечки база-эмиттер;

$I_{bc} = 1.5 \cdot 10^{-20}$ А – ;

$I_{sc} = 1.5 \cdot 10^{-20}$ А – ;

Данная схема не требует дополнительного анализа связи между электрическими и температурными схемами. Взаимосвязь между электрическими и температурными схемами учтена в самой схемной реализации, что делает анализ более затруднительным, по сравнению с ранее предложенными моделями [4]–[8], посредством этого снимаются проблемы сходимости, которые возникают при схемотехническом моделировании.

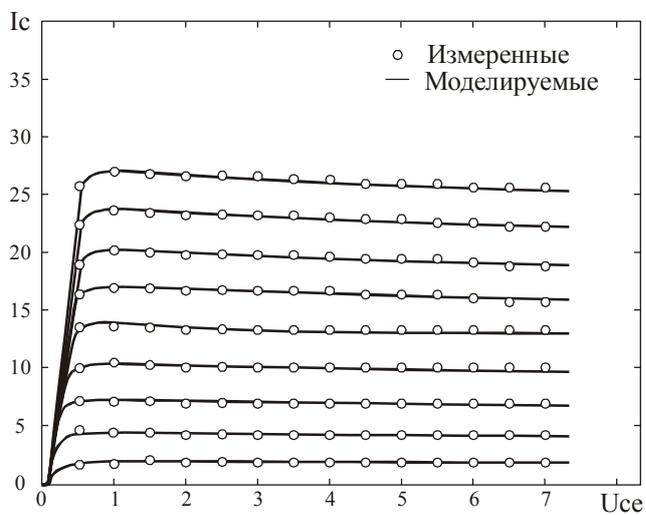


Рис.4. Моделируемые и измеренные ВАХ НВТ

Литература

1. C. J. Reimer, T. Smy, D. J. Walkey, B.C. Beggs and R. Surridge «A simulation study of Ic layout effects on thermal management of die attached GaAs ICs,» IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 23, no. 2, pp. 341–350, June 2000.
2. M. E. Kim, A.K. Oki, G.M. Gorman, D.K. Umemoto, J.B. Camou, «GaAs heterojunction bipolar transistors device and IC technology for high-performance analog and microwave application,» IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.37, no. 9, pp. 1286–1303, September 1989.
3. A. Garlapati and S. Prasad, «A unified model for single/multifinger HBTs including self-heating effects,» IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.49, no. 1, pp. 186–191, January 2001.
4. L. L. Liou and John L. Ebel, C. I. Huang, «Thermal effects on the characteristic of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors using two-dimensional numerical simulation,» IEEE Transaction on Electron Devices, vol. 40, no. 1, pp. 35–43, January 1993.
5. P. C. Grossman and J. Choma, «Large-signal modeling HBT's including self-heating and transit-time effects,» IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.40, no. 3, pp. 449–464, March 1992.
6. B. Li, S. Prasad, Li-Wu Yang and S. C. Wang, «Large-signal characterization of AlGaAs/GaAs HBT's,» IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, no. 9, pp. 1743–1746, September 1999.

7. K. Lu, Philip A. Perry, T. J. Brazil, «A new large-signal AlGaAs/GaAs HBT model including self-heating effects, with corresponding parameter-extraction procedure,» IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.43, no. 7, pp. 1443–1445, July 1995.
8. P. C. Grossman, J. Choma, «Large-signal modeling HBT's including self-heating and transit-time effects,» IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.40, no. 3, pp. 449–464, March 1992.
9. A. Samelis, D. Pavlidis, «Analysis of the large-signal characteristics of power heterojunction bipolar transistors exhibiting self-heating effects,» IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 45, no. 4, pp.534–541, April 1997.
10. Ce-Jun Wei, J. C. M. Hwang, Wu-Jing Ho and J. A. Higgins, «Large-signal modeling of self-heating, collector, transit-time, and RF-breakdown effects in power HBT's,» IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 44. no. 12, pp. 2641–2646, December 1996.
11. B. Li, S. Prasad, Li-Wu Yang, S. C. Wang, «Large-signal characterization of AlGaAs/GaAs HBT's,» IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, no. 9, pp. 1743–1746, September 1999.
12. C. C. McAndrew, «A complete and consistent electrical/thermal HBT model,» in IEE Bipolar Circuit Technol. Meet. Proc., 1992, pp. 200–203.