

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ SPICE-МОДЕЛЕЙ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУРЫ (–60 °С ... +125 °С)

К.О. Петросянц^{1,2}, Л.М. Самбурский^{1,2}, И.А. Харитонов¹

¹НИУ ВШЭ, Московский институт электроники и математики,
г. Москва

²Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН,
г. Москва

Введение. При изменении рабочей температуры в широком диапазоне характеристики большинства полупроводниковых приборов: диодов, транзисторов, а также электронных схем, построенных на их основе, значительно изменяются (см. напр. [1]). Поэтому для целей проектирования специальной электронной аппаратуры необходимо как разрабатывать более эффективные и оптимальные лабораторные методики испытаний, так и более глубоко внедрять в процесс проектирования регулярную практику схемотехнического моделирования электронных узлов с учётом тепловых эффектов. В основе такого моделирования лежат SPICE-модели электронных компонентов, причём параметры моделей определяются по результатам измерения электрических характеристик тестовых структур или реальных компонентов с учётом воздействия специальных факторов. Правильно построенная модель с хорошей точностью воспроизводит изменение параметров и характеристик исследуемого компонента при температурном воздействии, что даёт возможность методами моделирования оценивать смещение характеристик электронных схем.

Однако, процесс определения параметров моделей компонентов, в частности, биполярных транзисторов различного типа, в широком диапазоне изменения температуры недостаточно формализован и автоматизирован. В классической литературе по SPICE-моделированию (напр. [2, 3]) и периодических изданиях (напр. [4, 5]) приводятся отдельные, достаточно скудные, указания. В системе IC-CAP [6], предназначенной для экстракции параметров схемотехнических моделей и макромоделей, операция определения температурных параметров моделей биполярных транзисторов ни коим образом не автоматизирована. В результате операция определения параметров SPICE-моделей БТ в диапазоне изменения температуры часто выполняется с излишними задержками, а иногда даже с ошибками.

В данной работе описаны особенности процедуры измерения электрических характеристик и определения параметров SPICE-моделей

биполярных транзисторов различного типа в диапазоне изменения температуры от минус 60 °С до +125 °С, что проиллюстрировано на примере отечественного дискретного биполярного транзистора из состава транзисторной матрицы 1НТ251А. Подробная пошаговая полуавтоматизированная процедура экстракции параметров была реализована с использованием автоматизированного комплекса IC-CAP.

Особенности процедуры измерения характеристик. Разработанная методика экстракции параметров использует в качестве входных данных результаты измерения стандартных характеристик биполярных транзисторов (гуммелевских, выходных, резистивных, ёмкостных), определённых при различных дискретных значениях температуры.

Автоматизированное получение стандартного набора электрических характеристик биполярных транзисторов реализовано с помощью аппаратно-программного комплекса, содержащего измерительный стенд, действующий под управлением компьютера, и программную часть, производящую управление контрольно-измерительными приборами, накопление, первичную обработку и выгрузку данных измерений.

Для снижения эффекта саморазогрева при измерении обычных электрических характеристик транзисторов необходимо использовать импульсный метод [7]. Для отдельного определения параметров саморазогрева используется методика, описанная в [8].

Особенности процедуры экстракции параметров модели. Реализованная процедура экстракции параметров SPICE-модели, дающая возможность в дальнейшем проводить схемотехническое моделирование при любом промежуточном значении температуры, включает в себя следующие шаги:

- 1) выбор подходящей базовой SPICE-модели БТ, содержащей выражения для учёта существенно проявляющихся в нём эффектов;
- 2) определение самостоятельных наборов параметров SPICE-модели для каждого значения температуры, при котором проводились измерения;
- 3) выбор ограниченного перечня температурно-зависимых параметров модели среди полного набора параметров её базового и паразитных элементов;
- 4) получение табличной функции зависимости от температуры для каждого параметра п. 3);
- 5) аппроксимация табличных зависимостей п. 4) аналитическими функциями различного вида, чьи коэффициенты как раз являются температурными коэффициентами модели;

- б) включение полученных аналитических функций и/или температурных коэффициентов (в зависимости от способа их описания) в карту SPICE-модели.

Выбор базовой SPICE-модели в п.1) определяется типом моделируемых компонентов: в данном случае для переключательных транзисторов использовалась модель Гуммеля–Пуна для компонентов малой мощности и модель VBIC99 для компонентов средней и большой мощности. Операции п. 2) выполняются с использованием стандартной методики и программных средств, встроенных в комплекс IC-CAP. Перечень температурно-зависимых параметров п. 3) зависит от требуемой точности модели и предпочтительного режима работы транзистора и может включать в себя параметры, определяющие ток коллектора (IS , NF), ток базы (BF), эффекты высокого (IKF) и низкого (ISE , NE) уровня инжекции, резистивные (RC , RB , IRB , RE) и ёмкостные (CJE , CJC и др.) параметры. В качестве аргументов табличных функций п. 4) используется набор значений температуры, при которых проводились измерения. В качестве аналитических аппроксимирующих функций п. 5) предпочтительно использовать функции, заложенные в стандартную модель; однако в случае, если они не обеспечивают необходимую точность моделирования, температурно-зависимые параметры задаются в виде внешних функций, вычисляемых программой моделирования отдельно от вычислительного ядра модели.

При схемотехническом моделировании в программах Eldo, Spectre, UltraSim, HSpice и др. величина температуры задаётся для всей схемы в целом с помощью глобальной переменной $TEMP$ или для отдельного транзистора (если позволяет выбранная модель).

Особенности программной реализации процедуры экстракции.
Для частичной автоматизации описанных операций экстракции температурных параметров модели БТ был разработан программный модуль, работающий в рамках системы IC-CAP. В составе модуля реализованы операции п.п. 2, 4–6 описанной выше процедуры экстракции; оператор управляет ходом работы с помощью интерактивного графического интерфейса. По окончании работы с модулем оператор получает файл с картой SPICE-модели, который может быть непосредственно подключён к заданию на схемотехническое моделирование.

Для упрощения программной реализации процедуры экстракции был выбран набор №3 встроенных в модель аппроксимирующих функций, что задаётся параметром $TLEV=3$. При использовании этого набора функций определение коэффициентов для каждой из них сводится к поиску

коэффициентов параболы. Температурные зависимости параметров модели IS , ISE , IKF задаются в виде $X = X_0 \cdot (1 + TX1 \cdot \Delta T + TX2 \cdot \Delta T^2)$, где X и X_0 – значения температурно-зависимого параметра при заданной (T) и комнатной (T_{nom}) температуре; $\Delta T = T - T_{nom}$; $TX1$ и $TX2$ – температурные коэффициенты, определяемые в процессе выполнения. Температурные зависимости остальных параметров задаются в виде $X = X_0 \cdot (1 + TX1 \cdot \Delta T + TX2 \cdot \Delta T^2)$.

При использовании модуля заметно сокращается время экстракции (на 30–40%), повышается достоверность и точность (до уровня 10–15%) результирующей SPICE-модели.

Пример экстракции SPICE-модели БТ. С использованием разработанных методик и программного модуля нами были определены параметры SPICE-моделей биполярных транзисторов нескольких различных типов. Для установления температуры окружающей среды во время измерения использовалась камера тепла и холода. В качестве примера приведены результаты для n-p-n-транзистора из состава транзисторной матрицы 1НТ251А в диапазоне температуры (–60 °С ... +85 °С).

Результаты измерения гummелевских и выходных характеристик БТ при различных значениях температуры приведены на рис. 1 (символы); смоделированные характеристики, полученные по результатам экстракции параметров SPICE-модели на основе модели Гуммеля–Пуна, отмечены на том же рисунке сплошными линиями. Погрешность моделирования ВАХ не превышает 15 %.

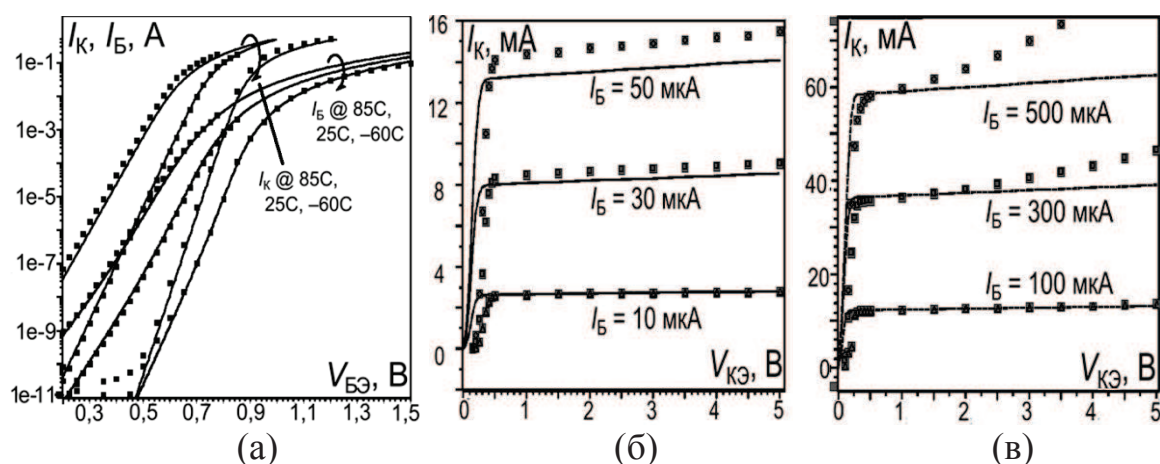


Рис. 1. Гуммелевские (а) характеристики биполярного транзистора 1НТ251А при температуре 85 °С, 25 °С и минус 60 °С; выходные характеристики при температуре 85 °С (б) и минус 60 °С (в)

Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 книгах. Пер. с англ., М.: Мир, 1984;
2. Massobrio G., Antognetti P. Semiconductor Device Modeling with SPICE. Second Edition. McGraw-Hill, Inc. 1993;
3. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0. – М.: Солон 1999;
4. J.C.J. Paasschens, W.J. Kloosterman, and R.J. Havens, Parameter Extraction for the Bipolar Transistor Model Mextram, Nat.Lab. Unclassified Report NL-UR 2001/801, 2001;
5. Huang G. W. et al., Silicon BJT modeling using VBIC model // Microwave Conference, 2001. APMC 2001, Vol. 1, PP. 240–243;
6. Agilent 85190A, IC-CAP 2006 User's Guide.
7. Accurate and Efficient Characterization of Power Devices at 3000 V/20 A // Agilent Technologies, Inc., Application Notes, USA, November 2009;
8. I. A. Kharitonov, Compact Power BJT and MOSFET models parameter extraction with account for thermal effects // Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'11), 2011, P. 271–274.