

УДК 621.382.323; 538.9

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМПАКТНОЙ МОДЕЛИ  
GaAs ГЕТЕРОПЕРЕХОДНЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Новиков П.Э.<sup>1</sup>, Кратович П.С.<sup>2</sup>, Корсак К.В.<sup>1</sup>, Ловшенко И.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск,  
Республика Беларусь, [p.novikov@bsuir.by](mailto:p.novikov@bsuir.by)

<sup>2</sup>ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», Минск, Республика Беларусь

Аннотация: Разработана методика определения параметров (экстракции) модели Mextram level 504 для гетеропереходных биполярных транзисторов (ГБТ) на основе GaAs. Экстрагированные параметры обеспечили высокую точность моделирования вольт-амперных характеристик, что подтверждает эффективность методики. Моделирование выполнено без использования специальных тестовых структур.

Ключевые слова: приборное моделирование, компактные модели, разработка моделей, экстракция параметров, гетеропереходные биполярные транзисторы, GaAs.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Выбор подходящей модели – неотъемлемый этап разработки полупроводниковых устройств. Из-за высокой стоимости производства тестовых структур и низкой эффективности отладки технологических процессов и конструктивных особенностей на их основе, для этого целесообразнее использовать компьютерное моделирование. Как следствие, модели должны удовлетворять ряду требований, что обусловило появление множества различных моделей полупроводниковых приборов и их модификаций для применения в конкретных особенных случаях, например, для определенного класса устройств [1]. Моделирование приборных структур ГБТ на основе GaAs возможно осуществлять с помощью модели MEXTRAM level 504, которая предназначена для другого класса приборов, однако позволяет учитывать основные эффекты, протекающие в структурах ГБТ. К тому же, особое внимание в MEXTRAM level 504 уделено работе с производными первого и высшего порядка, что приводит к повышению точности при определении выходной проводимости, частот среза и низкочастотных искажений третьего порядка, а также улучшению сходимости. Эти факторы крайне важны при моделировании устройств, работающих в СВЧ-диапазоне, поэтому для исследования выбрана именно эта модель. Она включает в себя 71 параметр, для определения которых необходимо выполнить серию расчетов. Для использования модели в схемотехнических расчетах (компактной модели) необходимо определить численные значения каждого из параметров для конкретной структуры. Для определения параметров используются вольт-амперные характеристики.

## II. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ MEXTRAM LEVEL 504

Реализована стратегия (методика определения), в соответствии с которой посредством использования модуля Utmost4 программного комплекса Silvaco проведена экстракция параметров модели Mextram level 504 [2-4]. Поскольку прямой режим работы транзистора более важен, чем обратный, эти параметры модели извлекаются в последнюю очередь. Таким образом, при необходимости можно пожертвовать точностью подгонки данных для обратного включения, чтобы добиться наилучшей сходимости данных для прямого включения транзистора.

Для определения параметров модели требуются прямые и обратные вольт-амперные характеристики, а также зависимости емкости каждого перехода от приложенного напряжения. Входные данные получены посредством компьютерного моделирования эксплуатационных характеристик типовой приборной структуры ГБТ в модуле Victory Procces программного комплекса Silvaco.

Предложенная методика определения параметров компактной модели состоит из семи этапов. Целью каждого этапа является оптимизация только тех параметров модели, которые оказывают наибольшее влияние на характеристику.

Модель Mextram объединяет уравнения емкости, которые и необходимо определить на первом этапе (чтобы избежать необходимости перенастраивать параметры модели постоянного тока позже), и заряда. Таким образом, на первом этапе определяются параметры модели: CJE, PE, VDE, CJC, PC, VDC, CJS, PS, VDS и XP, которые описывают зависимость емкости всех трех транзисторных переходов от напряжения. Максимальное отклонение результатов моделирования с учетом определенных

параметров модели от данных приборного моделирования (далее – отклонение) не превышает 0,02 % (среднее значение 0,01 %).

Второй этап включает определение параметров (по обратной зависимости Гуммеля): ток насыщения коллектор-эмиттер IS, ток насыщения базы при обратном включении IBR, коэффициент усиления идеального обратного тока базы BRI, сопротивление немодулированного эпитаксиального слоя RCV, переменная составляющая сопротивления базы при нулевом смещении RBV, постоянные составляющие сопротивления коллектора и базы RCC и RBC. Максимальное отклонение получено для параметров RCV, RBV, RCC и RBC (3,24 %), минимальное – IBR, BRI (0,29 %).

На третьем этапе определяется обратное напряжение Эрли VER. Максимальное отклонение составляет 50 %.

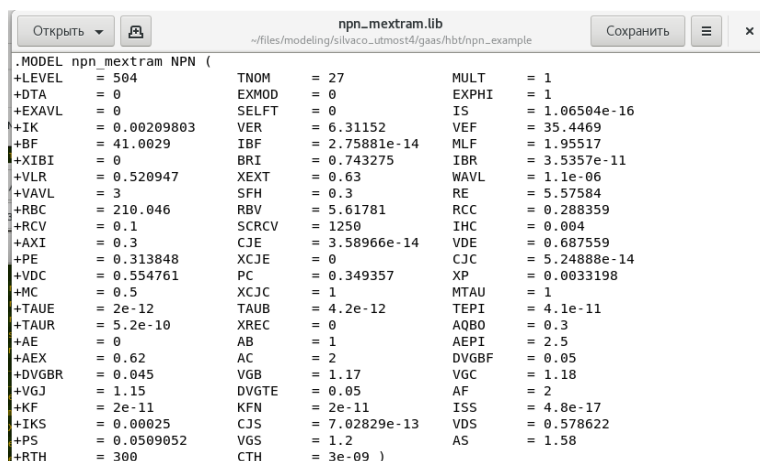
Четвертая секция используется для уточнения всех параметров, извлеченных в предыдущих двух секциях. Общая среднее отклонение не превышает 5,09 %.

Так как прямой режим работы наиболее важен, параметры модели Mextram 504, оказывающие на него наибольшее влияние, извлекаются в последнюю очередь. На пятом этапе определяются по прямой характеристике Гуммеля параметры IS, коэффициент идеального усиления прямого тока BF, ток насыщения неидеального прямого тока базы IBF, фактор неидеальности прямого тока базы MLF, сопротивление эмиттера RE и ток коллектор-эмиттер при высоком уровне инжекции IK.

На шестом этапе определяется прямое напряжение Эрли (максимальное отклонение 1,29 %).

Последний этап используется для уточнения всех параметров, характеризующих прямой режим работы транзистора и определенных на предыдущих этапах.

В результате реализации методики определения параметров компактной модели Mextram level 504 получен набор параметров (рисунок 1) ГБТ, который может быть использован в программах схемотехнического моделирования и топологического проектирования.



```
.MODEL npn_mextram NPN (
+LEVEL = 504          TNOM = 27          MULT = 1
+DTA = 0              EXMOD = 0          EXPHI = 1
+EXAVL = 0            SELFT = 0          IS = 1.06504e-16
+IK = 0.00209803     VER = 6.31152          VEF = 35.4469
+BF = 41.0029         IBF = 2.75881e-14      MLF = 1.95517
+XIBI = 0             BRI = 0.743275        IBR = 3.5357e-11
+VLR = 0.520947      XEXT = 0.63           WAVL = 1.1e-06
+VAVL = 3             SFH = 0.3             RE = 5.57584
+RBC = 210.046        RBV = 5.61781         RCC = 0.288359
+RCV = 0.1            SCRCV = 1250          IHC = 0.004
+AXI = 0.3            CJE = 3.58966e-14     VDE = 0.687559
+PE = 0.313848        XCJE = 0              CJC = 5.24888e-14
+VDC = 0.554761       PC = 0.349357        XP = 0.0033198
+MC = 0.5             XCJC = 1              MTAU = 1
+TAUE = 2e-12         TAUB = 4.2e-12        TEPI = 4.1e-11
+TAUR = 5.2e-10       XREC = 0              AQB0 = 0.3
+AE = 0               AB = 1                 AEPI = 2.5
+AEX = 0.62           AC = 2                 DVGBF = 0.05
+DVGBR = 0.045        VGB = 1.17            VGC = 1.18
+VGJ = 1.15           DVGTE = 0.05          AF = 2
+KF = 2e-11           KFN = 2e-11           ISS = 4.8e-17
+IKS = 0.00025        CJS = 7.02829e-13     VDS = 0.578622
+PS = 0.0509052       VGS = 1.2             AS = 1.58
+RTH = 300            CTH = 3e-09 )
```

Рисунок 1. Набор значений параметров модели Mextram level 504

Сравнение исходных характеристик и характеристик, полученных из компактной модели для схемотехнического моделирования, приведено на рисунке 2. За счет снижения точности в области обратных токов, удалось достичь относительной погрешности не более 10% относительно исходных данных без использования специальных тестовых структур для экстракции и верификации.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика (стратегия) определения параметров (экстракции) для реализации в моделях GaAs ГБТ на основе Mextram level 504. Предложенная стратегия состоит из 7 шагов, на каждом из которых численными методами определяются наиболее важные параметры, влияющие на электрические характеристики. Результатом выполнения описанной стратегии экстракции стал набор параметров модели. Вольт-амперные характеристики, полученные с использованием экстрагированных значений параметров модели, соответствуют результатам натурального эксперимента, что свидетельствует об эффективности исследуемой методики экстракции. Максимальная относительная погрешность схемотехнического моделирования с использованием экстрагированного набора параметров в сравнении с экспериментальными данными составила не более 10% без использования специальных тестовых структур.

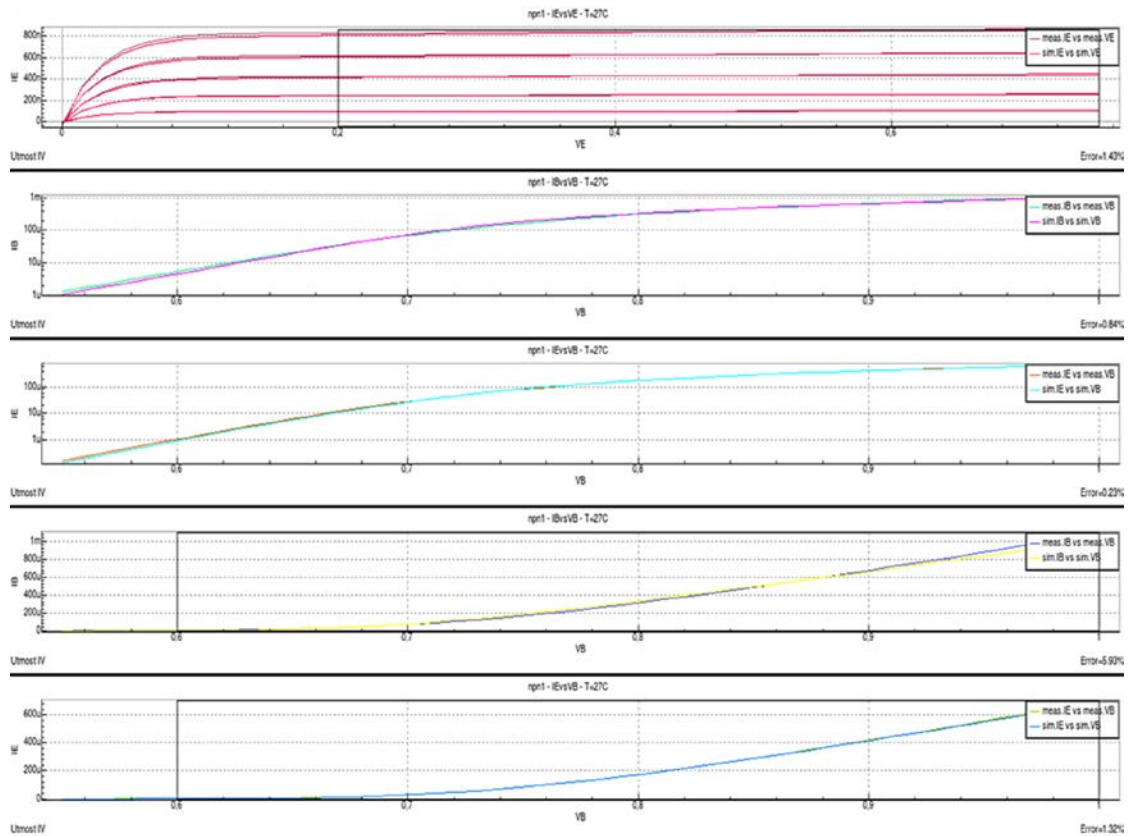


Рисунок 2. Сравнение результатов приборного и схемотехнического моделирования для приборной структуры ГБТ

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках гранта БРФФИ Т23МЭ-042.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Денисенко, В. В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике / В. В. Денисенко. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 408 с.
- [2] Parameter Extraction for the Bipolar Transistor Model Mextram Level 504 : Unclassified Report / J.C.J. Paasschens, W.J. Kloosterman, and R.J. Havens // Koninklijke Philips Electronics, 2001. – 111 p.
- [3] Mijalković, S. Compact modeling of SiGe HBTs: Mextram / S. Mijalković // Measurement and Modeling of Silicon Heterostructure Devices. – CRC Press, 2018. – P. 7-1.
- [4] Improved compact modeling of SiGe HBT linearity with MEXTRAM/ Zhang H. et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2021. – Vol. 68. – №. 6. – P. 2597-2603.

## VERIFICATION OF A METHODOLOGY FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF A COMPACT MODEL FOR GaAs HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTORS

P.E. Novikov<sup>1</sup>, P.S. Kratovich<sup>2</sup>, K.V. Korsak<sup>1</sup>, I.Yu. Lovshenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,  
[p.novikov@bsuir.by](mailto:p.novikov@bsuir.by)

<sup>2</sup>OJSC «Minsk Research Institute of Radio Materials», Minsk, Republic of Belarus

Abstract: A parameter extraction methodology for Mextram level 504 models of GaAs heterojunction bipolar transistors has been designed. The extracted parameters yielded high-accuracy simulation of current-voltage characteristics, which shows the methodology's effectiveness. Simulations were performed without the use of special test structures.

Keywords: device modelling, compact models, model implementation, parameter extraction, heterojunction bipolar transistor, GaAs.