

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 621.382.3

На правах рукописи

МАРУШКО
Валерий Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание степени
магистра техники и технологий

по специальности 1-39 81 01 – Компьютерные технологии
проектирования электронных систем

Минск 2019

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ПЕТЛИЦКАЯ Татьяна Владимировна**,
кандидат технических наук, доцент, начальник
сектора ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Рецензент: **СВИТО Иван Антонович**,
кандидат физико-математических наук, научный
сотрудник НИЛ энергоэффективных материалов
и технологии БГУ

Защита диссертации состоится «5» февраля 2019 г. года в 9⁰⁰ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П.Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Приборы, работающие в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), применяются в различных областях науки и техники, таких как: радиолокация, радиорелейная связь (мобильная связь, телефонные и телевизионные каналы), кабельная связь, космическая связь и др.

К диапазону СВЧ относят волны с частотой от 300 МГц до 300 ГГц, что соответствует длине волны от 1 мм до 1 м. Этот диапазон условно делят на поддиапазоны дециметровых волн (частоты от 300 МГц до 3 ГГц, длины волн от 0.1 м до 1 м), сантиметровых волн (частоты от 3 ГГц до 30 ГГц, длины волн от 0.01 м до 0.1 м), миллиметровых волн (частоты от 30 ГГц до 300 ГГц, длины волн от 0.001 м до 0.01 м).

Измерениям на СВЧ присущи ограничения технического порядка, связанные с несовершенством аппаратуры на этих частотах, так как трудно создать измерительные генераторы достаточной мощности со сверхширокополосной перестройкой, трудно создать обеспечить высокую частотную стабильность генераторов и т.д.

В диапазоне СВЧ ограничен выбор невзаимных устройств, позволяющих разделять волны разных направлений и улучшать согласование трактов. На малых частотах построение невзаимных устройств облегчается возможностями различных соединений в цепях, в диапазоне СВЧ с его полевой структурой волн приходится применять специальные волновые среды (например, ферриты) или комбинации линий передачи с полевой связью.

В силу перечисленных особенностей измерений на СВЧ для решения каждой конкретной измерительной задачи часто приходится индивидуально подбирать или заново разрабатывать собственную методику, а в ряде случаев и уникальную измерительную аппаратуру. Всегда требуется предварительный теоретический и расчетный анализ измерительной схемы, особенно в отношении калибровки и оценки погрешностей измерения.

В сложных измерительных приборах СВЧ, таких как анализаторы цепей и спектроанализаторы, вынужденно применяются особые высокие требования (по широкополосности и скорости перестройки, фазовым шумам и другим характеристикам) предъявляются к генераторам, выполняющим функции источников зондирующего сигнала или гетеродинов в частотных конверсиях.

На сегодняшний день существует большое число работ в области измерения параметров СВЧ-транзисторов. Наиболее значимы результаты в области измерения параметров были получены в работах А.В.Румянцева, Г.Н.Глазова, А.А.Афонского, *Q.Liang*, *F.Caspers*, *D.Anders*. Однако анализ отечественных и зарубежных работ показал, что отсутствует полная методика измерений параметров транзисторов в СВЧ диапазоне.

Исследование высокочастотных параметров биполярного транзистора позволяет строить более точные модели, при разработке устройств, что свидетельствует об актуальности данной диссертации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Важнейшим вопросом при разработке СВЧ устройств является моделирование параметров СВЧ активных и пассивных элементов, основанное на результатах измерений S -параметров. Моделирование может обеспечить первое приближение функциональных возможностей и характеристик схемы при различных входных и выходных условиях до передачи ИМС на изготовление.

Степень разработанности проблемы

В настоящее время существует достаточно большое количество работ в области микроэлектроники по анализу измерений на полупроводниках в области сверхвысоких частот.

Однако представлено недостаточное количество литературных данных по методике измерения, требованиям к тестовым структурам, калибровке измерительной установки.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка методики измерения высокочастотных характеристик тестового биполярного транзистора.

Поставленная цель работы определяет **следующие основные задачи:**

1. Проанализировать существующие методы анализа электрофизических характеристик полупроводниковых приборов, работающих в СВЧ-диапазоне.
2. Рассмотреть особенности конструкции, принципов работы и маршрута изготовления тестового биполярного СВЧ – транзистора, выпускаемых на ОАО «ИНТЕГРАЛ».
3. Разработать методику анализа высокочастотных характеристик тестового биполярного транзистора, выпускаемого на ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) ОСВО 1-39 81 01-2012 специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

Теоретической основой являются теоретические и практические положения отечественных и зарубежных исследователей по проблеме измерения высокочастотных характеристик биполярного транзистора.

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных ученых в области измерения параметров полупроводниковых приборов на СВЧ.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, све-

дений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в разработке методики измерения высокочастотных характеристик биполярного транзистора.

Теоретическая значимость работы заключается в подготовке методологических основ для последующих исследований высокочастотных характеристик элементной базы микросхем и других изделий полупроводниковой техники, выпускаемых на ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Практическая значимость диссертации состоит в подготовке методики измерения тестовых биполярных транзисторов, калибровки и верификации специализированных СВЧ-зондов, получении S -параметров биполярного транзистора с использованием диаграмм Смитта.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Систематизация методов анализа полупроводниковых приборов, работающих в СВЧ-диапазоне.

2. Анализ строения, работы и технологии производства тестового СВЧ биполярного транзистора, изготовленного на ОАО «ИНТЕГРАЛ».

3. Методика измерений высокочастотных характеристик биполярного транзистора.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на XXI Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (г. Рязань, Российская Федерация, 2018 г.), международной научно-практической молодежной конференции «Научные стремления–2018» (г. Минск, Беларусь, 2018 г.), научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития экспериментальной науки» (г. Тюмень, Российская Федерация, 2018 г.), международной научно-практической конференции «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы» (г. Уфа, Российская Федерация, 2019 г.), международной научно-практической конференции «Роль и место информационных технологий в современной науке» (г. Самара, Российская Федерация, 2019 г.).

Отдельные положения диссертации могут быть использованы при преподавании дисциплин «Проектирование интегральных микросхем».

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 6 печатных работах. В их числе 4 статьи в сборниках материалов научных конференций и 2 тезиса докладов на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 12 страниц.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе приведен обзор современного состояния проблемы методов исследования высокочастотных характеристик СВЧ-приборов.

Во второй главе рассмотрены особенности устройства, работы производства СВЧ биполярного транзистора.

В третьей главе представлена методика измерения высокочастотных характеристик биполярного транзистора.

В приложении представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертационной работы составляет 86 страниц. Из них 47 страниц основного текста, 33 иллюстрации на 11 страницах, 8 таблицы на 7 страницах, библиографический список из 50 наименований на 3 страницах, список собственных публикаций соискателя из 6 наименований на 1 странице, 4 приложений на 25 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы измерения на сверхвысоких частотах, указаны основные направления исследований, проводимых по данной тематике, а также описано обоснование актуальности темы.

В **общей характеристике работы** показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

В первой главе приведен обзор современного состояния проблемы измерений параметров полупроводниковых приборов, работающих в диапазоне сверх высоких частот.

Из анализа следует, что для анализа СВЧ устройства существуют два подхода: СВЧ устройство рассматривается в виде эквивалентной схемы или как «черный ящик». Так как расчет эквивалентной схемы сложен удобно рассматривать с помощью внешних параметров, связывающих напряжения и токи на внешних выводах, так называемый четырехполюсник.

Чтобы охарактеризовать четырехполюсник, показанный на рисунке 1, используются различные наборы параметров, каждый из которых имеют свои

преимущества и недостатки. Каждый набор параметров имеет четыре переменные, связанные с четырехполюсником. Две из них представляют собой параметры падающей волны (независимые переменные), другие же две представляют собой параметры отраженной волны (зависимые переменные).



a_1, a_2 – падающая волна, b_1, b_2 – отраженная волна

Рисунок 1 – Четырехполюсник

Среди различных наборов параметров была выбрана система S -параметров, так как для других наборов параметров необходимо устанавливать в измерительной цепи режим холостого хода или короткого замыкания. Это может вызвать ряд проблем при работе транзисторов. Для измерения S -параметров необходимо поместить измеряемое устройство в линию, в которой заранее известно сопротивление, например, в линию сопротивлением 50 Ом.

Падающие и отраженные волны, a и b соответственно, в этом случае связываются универсальной матрицей рассеяния волн мощности.

Матрица рассеяния связывает падающие и отраженные волны следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U_{1\text{ отр}} \\ U_{2\text{ над}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{1\text{ над}} \\ U_{2\text{ отр}} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Формула 1 является одним из примеров использования S -параметров при проектировании СВЧ устройств и трактов. Также S -параметры применяются при нахождении коэффициента отражения, анализа устойчивости работы и др.

Во второй главе проанализировано устройство, работа биполярного СВЧ транзистора, входящего в набор сформированной матрицы тестовых транзисторов. Фото фрагмента матрицы, сделанное при 10 кратном увеличении, представлено на рисунке 2.

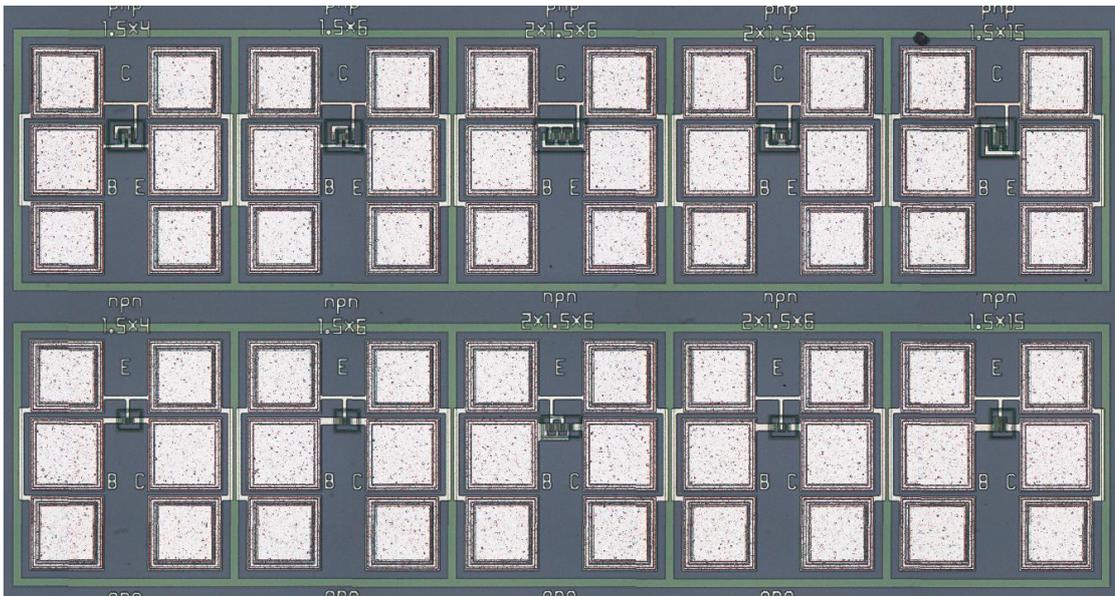


Рисунок 2 – Фрагмент матрицы

На рисунке 3 представлено фото одиночного тестового биполярного транзистора, сделанное при 50 кратном увеличении.

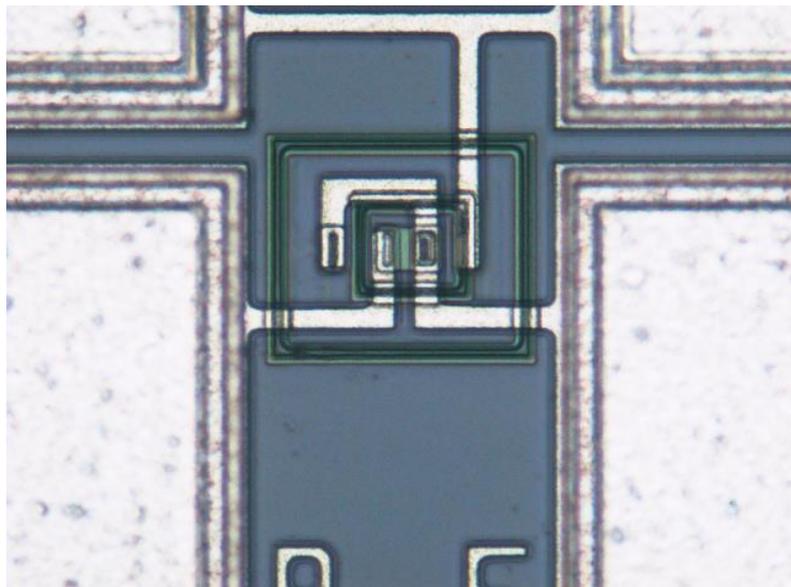


Рисунок 3 – Тестовый биполярный транзистор

Измерение характеристик СВЧ биполярного транзистора будет проводиться на транзисторе, приведенном на рисунке 3, изготовленным на ОАО «ИНТЕГРАЛ».

В третьей главе сформированы требования к контактным площадкам и зондам для измерения тестовых транзисторов и методика измерения высокочастотных характеристик биполярного транзистора.

Измерения проводили на полуавтоматической зондовой станции MPI *TS2000-SE* ф. *MPI* с помощью векторного анализатор цепей *E5061B*. Данная установка показана на рисунке 4.



Рисунок 4 – Полуавтоматическая зондовая станция *MPI TS2000-SE*

Одним из функционально сложных узлов систем измерения на пластинах является СВЧ зонд, с помощью которого обеспечивается переход от измерительного тракта системы к микросхеме. Поэтому были рассмотрены типы зондов используемых для измерений на СВЧ:

- СВЧ зонды типа *G-S* (земля-сигнал) и *S-G* (сигнал-земля);
- СВЧ зонд типа *G-S-G* (земля-сигнал-земля).

В классификации зондовых головок есть такое понятие, как шаг зондовой головки, т. е. расстояние между центрами иглонок, рисунок 5. Шаг зондовой головки равен расстоянию между центрами контактных площадок тестовой структуры.

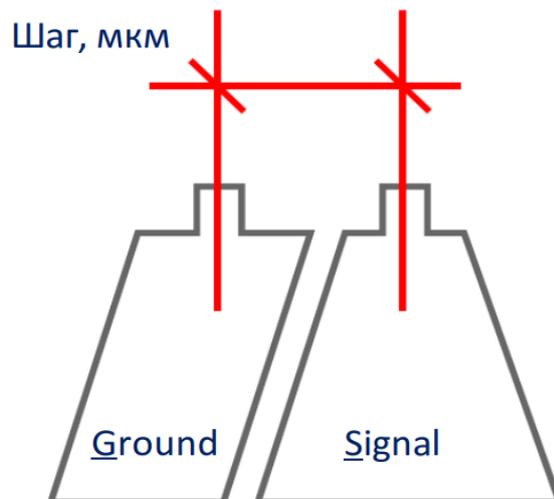


Рисунок 5 – Конфигурация и шаг зондовой головки типа *G-S* (земля-сигнал)

К тестовым структурам необходимы особые требования, такие как: расстояние между центрами контактных площадок должно быть минимально возможным для конкретного технологического процесса; необходимо заколотить контакт на землю.

Рассмотрим методику измерения высокочастотных характеристик биполярного транзистора.

1 Перед измерениями необходимо провести полную двухпортовую калибровку (измерение отражения и прохождения). В полной двухпортовой калибровке устраняются 12 систематических ошибок – шесть ошибок прохождения и шесть ошибок отражения.

При калибровке используют специфические калибровочные стандарты. Для двухпортового метода калибровки общего назначения используют калибровочный стандарт *Short-Open-Load-Thru (SOLT)* или аналогичный ему стандарт *Thru-Open-Short- Match (TOSM)*.

Калибруется измерительная система с помощью калибровочной ложки *AC2 ф.МРІ*.

2 Для измерений высокочастотных характеристик нужно поместить измеряемую пластину в зондовую станцию и с помощью векторного анализатора анализатор цепей провести измерения. Измеренные результаты записываются в виде отдельного файла и в дальнейшем могут быть переданы разработчикам СВЧ устройств для составления уточненных моделей.

Полученные в результате измерения *S*-параметры показаны в таблице 1 и отображены графически с помощью диаграмм Смита и в полярных координатах на рисунках 6, 7, 8, 9.

Таблица 1 – Результаты измерения *S*-параметров

Частота	<i>S</i> -параметры			
	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}
50 МГц	0,972-j0,127	0,005+j0,053	0,005+j0,052	1,014-j0,062
650 МГц	0,161-j0,838	0,396+j0,242	0,396+j0,240	0,709-j0,541
1,25 ГГц	-0,320-j0,721	0,539+j0,033	0,539+j0,032	0,433-j0,723
1,85 ГГц	-0,531-j0,581	0,505-j0,125	0,505-j0,126	0,195-j0,829
2,45 ГГц	0,655-j0,446	0,408-j0,204	0,407-j0,205	-0,046-j0,840
3,05 ГГц	0,729-j0,347	0,330-j0,231	0,329-j0,232	-0,218-j0,829
3,65 ГГц	-0,779-j0,257	0,264-j0,233	0,264-j0,234	-0,356-j0,7,94
4,25 ГГц	-0,809-j0,175	0,212-j0,222	0,212-j0,222	-0,465-j0,748
4,85 ГГц	-0,829-j0,097	0,172-j0,202	0,171-j0,203	-0,549-j0,698
5,45 ГГц	-0,837-j0,023	0,141-j0,180	0,140-j0,180	0,617-j0,646
6,05 ГГц	-0,837+j0,045	0,117-j0,156	0,117-j0,156	-0,669-j0,598

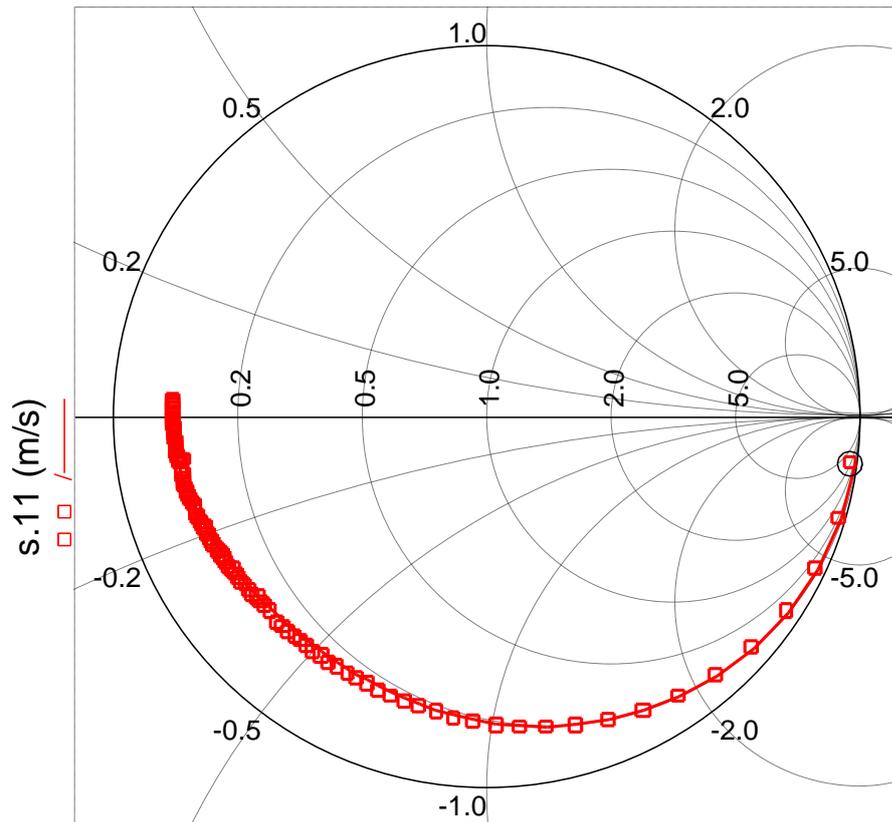


Рисунок 6 – Результаты измерений СВЧ транзистора, параметр S_{11}

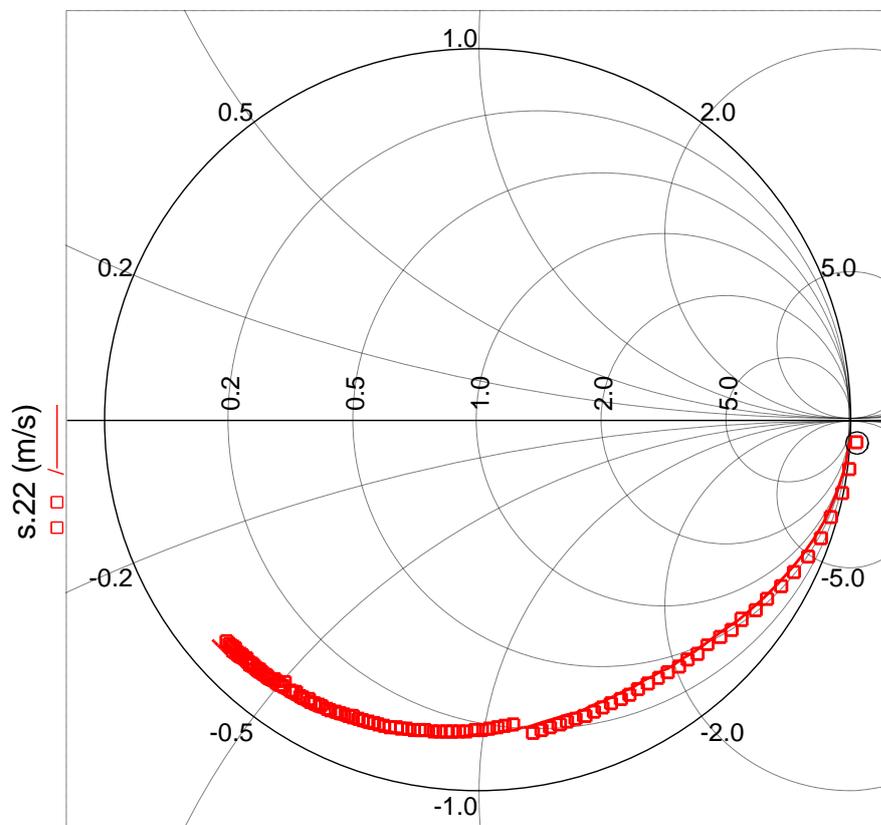


Рисунок 7 – Результаты измерений СВЧ транзистора, параметр S_{22}

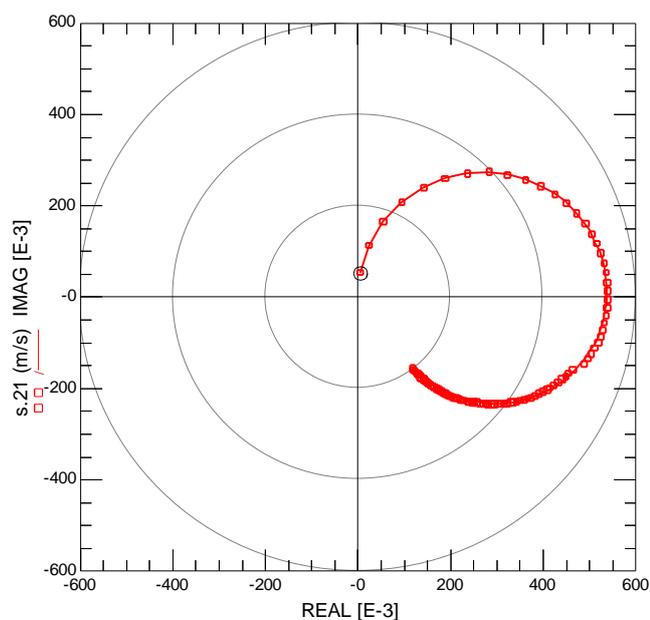


Рисунок 8 – Результаты измерений СВЧ транзистора, параметр S_{21}

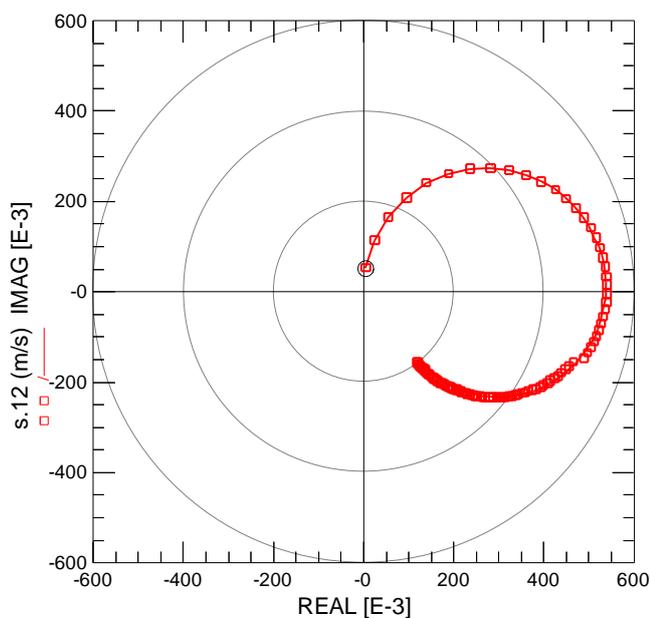


Рисунок 9 – Результаты измерений СВЧ транзистора, параметр S_{12}

Полученные результаты измерения S -параметров соответствуют параметрам, приведенным в конструкторской документации на производство биполярного СВЧ транзистора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведен анализ известных стандартов калибровки для ВЧ и СВЧ измерений и был выбран метод калибровки полной двухпортовой калибровки. Метод является удобным и наиболее эффективным в использовании, суще-

ственно снижающим погрешность измерений и увеличивающий точность измерений [3].

2. Сформулированы требования к тестовым структурам активных и пассивных элементов субмикронных ИМС [5], измерительной оснастке [4], процедуре проведения калибровки [1, 6].

3. Результаты анализа высокочастотных характеристик биполярного транзистора и моделирование, на основе этих данных, позволит увеличить точность моделей интегральных микросхем в ВЧ и СВЧ диапазоне, также увеличит процент выхода годных изделий еще на этапе проектирования [2].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Проектирование интегральных микросхем».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в сборниках научных трудов

1. Марушко, В.Н. Особенности измерения СВЧ-приборов / В.Н. Марушко // Научные стремления–2018: сборник материалов Международной научно-практической молодежной конференции, Минск, Республика Беларусь, 4–5 декабря 2018 г. – С. 127–129.

2. Марушко, В.Н. Анализ высокочастотных характеристик СВЧ-транзисторов / В.Н. Марушко // сборник статей международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития экспериментальной науки», Тюмень, РФ, 26 декабря 2018 г. – С. 133-135.

3. Марушко, В.Н. Калибровочные стандарты, используемые при измерениях на СВЧ / В.Н. Марушко // сборник статей международной научно-практической конференции «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы», Уфа, РФ, 11 января 2019 г. – С. 61-63.

4. Марушко, В.Н. Зонды для измерений в СВЧ диапазоне / В.Н. Марушко // сборник статей международной научно-практической конференции «Роль и место информационных технологий в современной науке», Самара, РФ, 17 января 2019 г. – С. 97-99.

Тезисы конференций

5. Марушко, В.Н. Требования к тестовым структурам для СВЧ измерений / В.Н. Марушко // материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «НИТ–2018», Рязань, РФ, 12–14 декабря 2018 г. – С. 133.

6. Марушко, В.Н. Методика калибровки и верификации при СВЧ измерениях / В.Н. Марушко // материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «НИТ–2018», Рязань, РФ, 12–14 декабря 2018 г. – С. 134.

РЭЗІЮМЭ
Марушка Валерый Мікалаевіч
Даследаванне высокачашчынных характарыстык
біпалярнага транзістара

Ключавыя словы: біпалярны транзістар, S-параметры.

Мэта працы: распрацоўка metodyкі вымярэння высокачашчынных характарыстык біпалярнага транзістара.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: выкананы аналіз існуючых метадаў вымярэння высокачашчынных характарыстык ЗВЧ-прыбораў. Выяўлена, што ў цяперашні час у айчынных і замежных крыніцах недастаткова асветлены пытанне вымярэння S-параметраў; распрацавана metodyка вымярэння высокачашчынных характарыстык тэставага біпалярнага транзістара; з дапамогай атрыманых вынікаў можна будаваць больш дакладныя мадэлі ЗВЧ-транзістараў.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранены ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі» ў навучальны курс «Праектаванне інтэгральных мікрасхем».

Вобласць ужывання: паўправадніковая прамысловасць, вымяральныя сістэмы.

РЕЗЮМЕ

Марушко Валерий Николаевич Исследование высокочастотных характеристик биполярного транзистора

Ключевые слова: биполярный транзистор, S -параметры.

Цель работы: разработка методики измерения высокочастотных характеристик биполярного транзистора.

Полученные результаты и их новизна: выполнен анализ существующих методов измерения высокочастотных характеристик СВЧ-приборов. Выявлено, что в настоящее время в отечественных и зарубежных источниках недостаточно освещен вопрос измерения S -параметров; разработана методика измерения высокочастотных характеристик тестового биполярного транзистора; с помощью полученных результатов можно строить более точные модели СВЧ-транзисторов.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в учебный курс «Проектирование интегральных микросхем».

Область применения: полупроводниковая промышленность, измерительные системы.

SUMMARY

Marushka Valery Nikolaevich

Research of the high-frequency characteristics of the bipolar transistor

Keywords: bipolar transistor, S-parameters.

The object of study: Development of methods for measuring the high-frequency characteristics of a bipolar transistor.

The results and novelty: The analysis of existing methods for measuring the high-frequency characteristics of microwave devices is performed it was revealed that at present in the domestic and foreign sources the issue of measuring s-parameters is insufficiently covered; a technique has been developed for measuring the high-frequency characteristics of a test bipolar transistor; Using the obtained results, it is possible to build more accurate models of microwave transistors.

Degree of use: the results implemented in the educational process at the department of design information and computer systems educational institution «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics» in the training course «Integrated circuit design ».

Sphere of application: semiconductor industry, measuring systems.