

## Методика проектирования GaAs p-i-n диодов с помощью САПР TCAD

**Зубков А. М., Гарбер Г. З., Малеев С. А.**

*Представлены результаты моделирования GaAs p-i-n диодов с помощью программ DIPIND и САПР TCAD. Показано, что использовать TCAD при разработке приборов на основе соединений A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> можно, но при условии тщательной калибровки моделей по надёжным данным, полученным из дополнительных источников. Рассчитана предельная СВЧ мощность, которую может переключать GaAs p-i-n диод в пятидесятиомном тракте при заданном управляющем токе.*

### Введение

Приборно-технологическая система автоматизированного проектирования (САПР) ISE TCAD [1] при своём создании была в первую очередь ориентирована на кремниевые приборы. Последние версии САПР TCAD (например [2]) пополнены библиотеками моделей, предназначенных для использования TCAD при проектировании приборов на основе соединений A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>. Однако, как показывает практика, адекватность моделей требует дополнительной проверки. Цель данной работы - выбор и при необходимости калибровка тех моделей библиотеки САПР TCAD, которые необходимы при моделировании и проектировании арсенид-галлиевых приборов. Попутно решалась практическая задача определения максимальной СВЧ мощности, которую может переключать помещённый последовательно в пятидесятиомный тракт планарный GaAs p-i-n диод при заданном управляющем токе. Эта задача, в частности, актуальна при разработке СВЧ монолитных интегральных схем (СВЧ МИС) фазовращателей.

GaAs p-i-n диод был выбран еще и потому, что в распоряжении авторов имеются апробированная программа моделирования таких диодов [3, 4, 5] и надёжные экспериментальные данные по измерениям на СВЧ остаточного сопротивления GaAs p-i-n диодов.

### Калибровка моделей TCAD

В работе идёт речь о переключательных p-i-n диодах, которые использовались при проектировании фазовращателей. В зависимости от управляющего сигнала диод находится либо в запертом состоянии, либо в открытом. При проектировании схем на переключательных диодах используются две различные эквивалентные схемы на СВЧ для каждого из этих состояний, показанные на рис. 1.

Последовательное сопротивление  $R_s$  для обоих состояний приблизительно одинаково. В работе рассматривались планарные GaAs p-i-n диоды круглой формы, изготовленные на эпитаксиальной структуре GaAs: полуизолирующая подложка -  $n^+$  -  $n$  -  $p^+$ . Для таких диодов последовательное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R_s \approx \frac{R_{sn} +}{8 \cdot \pi} + \frac{\sqrt{\rho k \cdot R_{sn} +}}{\pi d}$$

Здесь  $R_{sn+}$  - поверхностное сопротивление эпитаксиального  $n^+$  -слоя,  $d$  и  $\rho_k$  - внутренний диаметр контакта к  $n^+$ -слою и его удельное контактное сопротивление соответственно.

Величины  $C_i$  и  $R_i$  для запертого состояния - это ёмкость и сопротивление  $n^-$  -области диода, которая в запертом состоянии полностью перекрыта объёмным зарядом. В открытом состоянии  $n^-$  -область диода залита инжектированными из  $n^+$  и  $p^+$  -областей электронами и дырками. Важнейшей характеристикой  $p-i-n$  диода в этом состоянии является остаточное сопротивление  $n^-$  -области -  $R_i$ . Сопротивления диффузионных ёмкости ( $C_{dif}$ ) и параллельного ей сопротивления ( $R_{dif}$ ) на СВЧ заведомо много меньше величин  $R_i$  и  $R_s$  и ими, как правило, можно пренебречь. Величина  $R_i$  для открытого состояния в первом приближении прямо пропорциональна квадрату толщины ( $W_i$ )  $n^-$  -области диода и обратно пропорциональна величинам подвижности ( $\mu$ ) и времени жизни носителей тока ( $\tau$ ) в этой области, а также постоянной составляющей тока через диод ( $I_o$ ):

$$R_i \sim \frac{W_i^2}{\mu \cdot \tau \cdot I_o}$$

Более точное значение величины  $R_i$  можно получить только по результатам моделирования его работы на СВЧ.

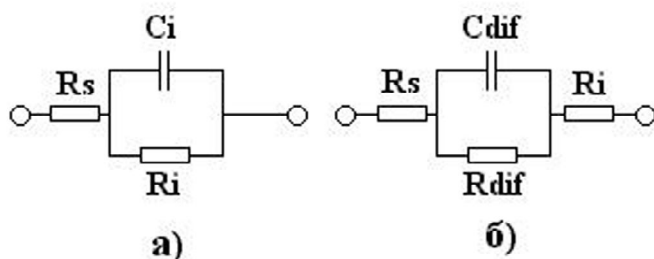


Рис. 1.

Эквивалентные схемы переключающего  $p-i-n$  диода: а) в запертом состоянии, б) в открытом состоянии

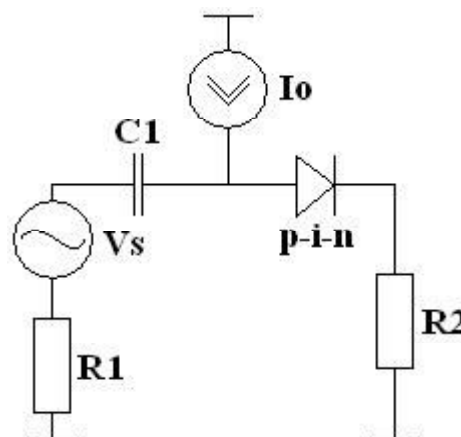


Рис. 2.

Схема включения диода, использованная при расчётах по программе Dessis

Остаточное сопротивление диода определяется в основном параметрами  $n^-$  -области диода. Если концентрация доноров  $n \approx 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  незначительно сказывается на параметрах переключающего  $p-i-n$  диода, а толщина  $n^-$  -области достаточно точно задаётся технологией, то время жизни носителей заряда в  $n^-$  -области известно очень приблизительно.

При моделировании диода в САПР TCAD были использованы программы Devise, Mesh, Dessis и Tecplot. В программе Devise задавали структуру GaAs  $p-i-n$  диода с концентрациями  $p^+ = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $n^- = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $n^+ = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Контакты расположили сверху и снизу, то есть решалась одномерная задача. Программа Mesh задавала сетку, на которой работала программа моделирования диода Dessis. Используя раздел System в программе Dessis, включали диод в схему, показанную на рис. 2.

Параметры схемы:  $R1 = R2 = 50$  Ом,  $C1 = 20$  пФ, амплитуда синусоидального сигнала для определения остаточного сопротивления диода бралась равной  $V_s = 0,05$  В на частоте  $f = 3$  ГГц.

После подключения к программе Dessis файлов с параметрами моделей для GaAs просчитывали характеристики диода. Рассчитанная зависимость остаточного сопротивления диода от управляющего тока  $I_0$  показана на рис. 3 кривой 1. На том же рисунке показаны экспериментальные данные и результаты моделирования диода по программе DIPIND.

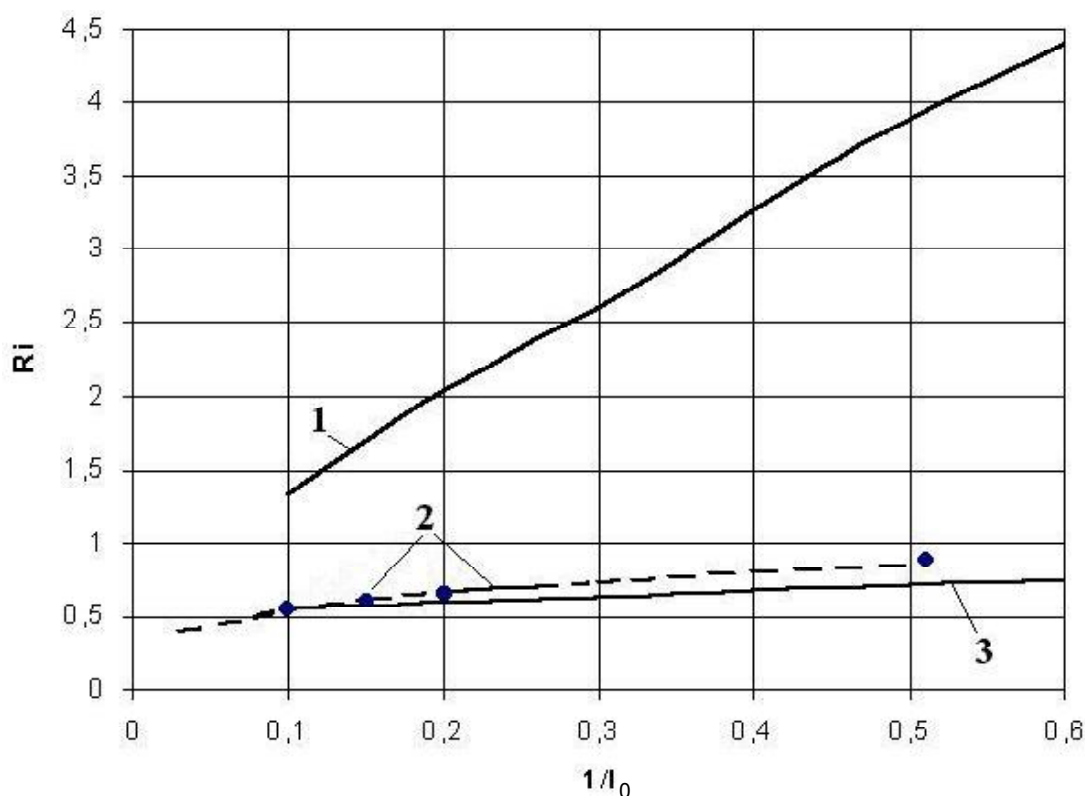


Рис. 3.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных:  
1 - расчёт по программе Dessis с моделями, принятыми по умолчанию; 2 - расчёт по программе DIPIND и экспериментальные данные; 3 - расчёт по программе Dessis после коррекции моделей

Как видно из рис. 3, TCAD выдал значения остаточного сопротивления диода, в несколько раз превышающие измеренные величины. Наклон полученной зависимости остаточного сопротивления от  $1/I_0$  оказался на порядок более крутым, чем у экспериментальных данных. То есть величина  $1/(\mu\tau)$ , полученная по расчётам TCAD, во много раз превышает действительную величину. Анализ результатов работы программы Dessis с помощью программы Tecplot показал, что рассчитанная подвижность электронов в  $n$ -слое  $p-i-n$  диода при управляющем токе  $I_0 = 1$  мА составила  $\sim 2000$  см<sup>2</sup>В/с для концентрации подвижных носителей  $n = p = 5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Для GaAs  $n$ -типа это явно заниженная величина [6]. Время жизни неосновных носителей заряда в этих же условиях по данным программы Dessis оказалось равным  $\sim 2 \cdot 10^{-9}$  с, что тоже является весьма сомнительным. Программа DIPIND показала прекрасное совпадение с экспериментом (кривая 2 рис. 3) при использовании на

---

порядок большей величины времени жизни.

Внимательное рассмотрение файлов программы Dessis с данными для арсенида галлия показало отсутствие управляющих коэффициентов для модели рассеяния на подвижных носителях и для модели рекомбинации Шокли-Рида. Откуда взяла программа Desis данные для этих моделей при проведении расчётов - неясно. Поэтому мы исключили из раздела физики в управляющем файле для программы Dessis модель рассеяния на подвижных носителях. После этого программа Tecplot показала подвижность электронов в  $n$ -слое диода, равную  $8000 \text{ см}^2/\text{с}$ . Это соответствует подвижности электронов в арсениде галлия при концентрации доноров  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  [6]. Модель рекомбинации Шокли-Рида заменили имеющейся в файле данных для арсенида галлия моделью излучательной рекомбинации. Это тем более оправдано, что в GaAs абсолютный минимум дна зоны проводимости и максимум потолка валентной зоны находятся при одном и том же значении волнового вектора, равном нулю. Это делает прямые переходы электронов зона-зона с испусканием фотона доминирующим механизмом рекомбинации. При указанном выше режиме работы открытого диода программа Tecplot показала время жизни неосновных носителей, равное  $2,4 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ , и концентрацию электронов и дырок в  $n$ -слое диода, равную  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

После указанных корректировок управляющего файла программа Dessis выдала вполне приемлемые результаты, показанные кривой 3 рис. 3. На этом калибровку моделей сочли законченной.

### *Зависимость остаточного сопротивления $p$ - $i$ - $n$ диода от СВЧ мощности*

Для получения зависимости остаточного сопротивления  $p$ - $i$ - $n$  диода от СВЧ мощности с помощью САПР TCAD в схеме рис. 2 варьировалась амплитуда сигнала  $V_s$ . Дополнительный контроль правильности работы TCAD осуществлялся сравнительными расчётами по программе DIPIND. Результаты для диодов с диаметром 50 мкм приведены на рис. 4.

Расчёты проводились при двух значениях управляющего тока  $I_0$ , равных 2 мА и 4 мА. Как видно из рисунка, результаты расчётов по программе DIPIND и в САПР TCAD близки.

Заметное увеличение остаточного сопротивления при управляющем токе  $I_0 = 2 \text{ мА}$  начинается с амплитуды СВЧ тока 0,1 А, а при  $I_0 = 4 \text{ мА}$  - с 0,2 А. Это соответствует допустимой СВЧ мощности, которую может переключать диод в пятидесятиомном тракте, равной 0,25 Вт и 1 Вт соответственно. Рассеиваемая диодом мощность при этом не превышает 10 мВт.

Увеличение остаточного сопротивления  $p$ - $i$ - $n$  диодов с возрастанием амплитуды СВЧ тока можно объяснить тем, что при увеличении амплитуды накопленные в  $n$ -слое диода избыточные носители тока успевают в значительной мере рассасываться за время отрицательного полупериода колебаний СВЧ тока. Интересные результаты получены при дальнейшем увеличении мощности и, соответственно, амплитуды тока (рис. 5). Как видно из рис. 5, при большой амплитуде СВЧ тока остаточное сопротивление GaAs  $p$ - $i$ - $n$  диодов проходит через максимум. По-видимому, поведение диодов становится похожим на то, что наблюдалось в квазиактивных ограничителях мощности [5].

GaAs p-i-n диод - диаметр 50 мкм,  $f = 3$  ГГц

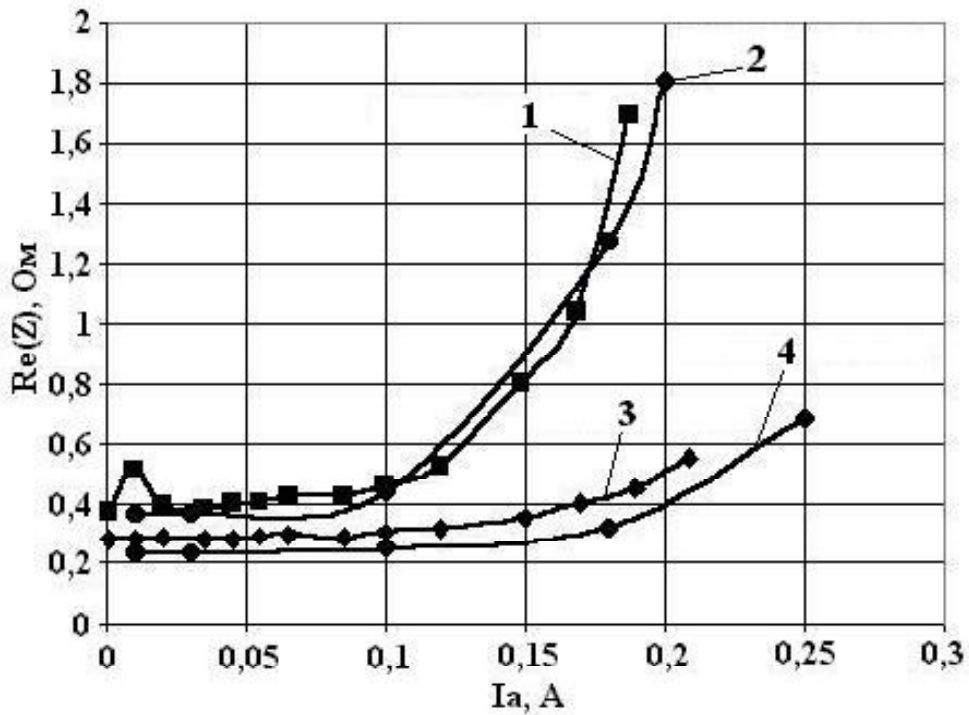


Рис. 4.

Зависимость остаточного сопротивления GaAs p-i-n диодов от амплитуды СВЧ тока. Кривые 1, 3 - результаты, полученные с помощью САПР TCAD:  $I_0 = 2$  мА и 4 мА соответственно; 2, 4 - с помощью DIPIND:  $I_0 = 2$  мА и 4 мА

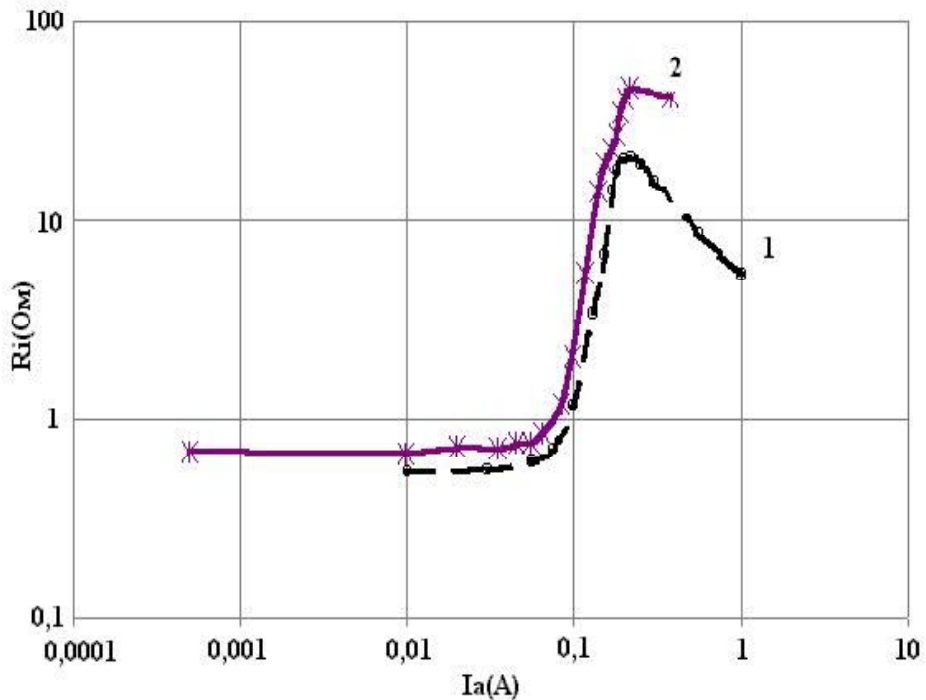


Рис. 5.

Изменение остаточного сопротивления GaAs p-i-n диодов при высокой амплитуде СВЧ тока: 1 - расчёты по программе DIPIND, 2 - в TCAD

---

## Выводы

1. Разработчиков полупроводниковых приборов на основе соединений  $A^3B^5$  привлекает в САПР ISE TCAD ее универсальность. Использовать TCAD при разработке приборов можно, но при условии тщательного отбора учитываемых в управляющем файле физических явлений и калибровке моделей по надёжным данным, полученным из дополнительных источников.

2. После калибровки моделей в работе удалось с помощью системы TCAD провести адекватное моделирование GaAs *p-i-n* диодов.

3. Получены данные о предельной СВЧ мощности, которую может переключать GaAs *p-i-n* диод в пятидесятиомном тракте.

4. Найдено, что при увеличении СВЧ мощности остаточное сопротивление GaAs *p-i-n* диодов проходит через максимум.

Авторы выражают искреннюю благодарность д.т.н. В. М. Вальд-Перлову и д.т.н. Ю. А. Каменецкому за предоставление экспериментальных данных.

## Литература

1. W. Fichtner. Latest Edition. - ISE News, August 2004.
2. ISE TCAD release 10.0 User Manual.
3. Гарбер Г. З. Программа моделирования арсенид-галлиевых *p-i-n* диодов DIPIND. - Авторское свидетельство № 2007612558 с приоритетом от 26 апреля 2007 г.
4. Аболдеев И. М., Вальд-Перлов В. М., Вейц В. В., Гарбер Г. З., Зубков А. М., Миннебаев В. М. Копланарный монолитный широкополосный ограничитель мощности с ультранизкими вносимыми потерями на малом сигнале. - Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, вып. 1, 2007, с. 56-63.
5. Зубков А. М., Гарбер Г. З. Результаты моделирования на ЭВМ работы GaAs *p-i-n* диодов в квазиактивном ограничителе СВЧ мощности. - Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, вып. 2, 2007, с. 76-82.
6. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов / Перевод с английского под ред. Р. А. Суриса. - М.: Мир, 1984, том 1, с. 34.