

## Новые возможности анализа вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов

**Олег ДВОРНИКОВ**  
Oleg\_Dvornikov@tut.by  
**Борис ЛИСЕНКОВ**  
**Юрий ШУЛЬГЕВИЧ**  
**Аркадий ТОЛКУН**

**Рассмотрены новые возможности анализа полупроводниковых приборов и структур, предоставляемые измерителем параметров ИППП-1 при совместном использовании с графическим постпроцессором Probe.**

С увеличением степени интеграции микросхем, в частности при переходе к субмикронным размерам элементов, значительно возрастают требования к техническим характеристикам и функциональным возможностям электроизмерительных приборов, предназначенных для исследования полупроводниковых структур. Это, прежде всего, связано с необходимостью оперативного контроля качества технологических процессов, параметров сформированных интегральных элементов и быстрого реагирования для приведения технологического маршрута изготовления микросхем в соответствие с нормативной документацией [1].

Для этих целей при создании современных БИС/СБИС используются анализаторы параметров полупроводниковых приборов (*semiconductor parameter analyzer*), которые позволяют выполнять автоматизированные измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), набирать статистические данные, обрабатывать их по различным встроенным алгоритмам и на основе результатов обработки осуществлять идентификацию параметров «Spice-моделей», конструктивно-технологических и электрофизических параметров.

Измерительный прибор такого вида (измеритель параметров полупроводниковых приборов ИППП-1) создан в ОАО «МНИПИ». Он включает до 4 управляемых от внешнего компьютера источников-измерителей, программное обеспечение *LIDER* для предварительной обработки результатов измерений [2, 3] и отличается от ближайших зарубежных аналогов значительно меньшей (в 3–10 раз) стоимостью.

Использование ИППП-1 для измерений различных элементов интегральных микросхем позволило установить целесообразность в некоторых случаях адаптации измерителя параметров к зондовым установкам и необходимость расширения возможностей математической обработки результатов измерений. Это объясняется тем, что современные интегральные транзисторы имеют малые горизонтальные и вертикальные размеры, в связи с чем характеризуются высокой граничной частотой и при определенных условиях подсоединения могут самовозбуждаться. С другой стороны, прибор ИППП-1 ориентирован прежде всего на выполнение измерений в пикоамперном диапазоне токов, для чего входящий в комплект ИППП-1 модуль МП1, предназначенный для подключения к зондовой установке, снабжен антивибрационными-

ми кабелями типа АВК-6, паразитные параметры которых могут привести к самовозбуждению исследуемых высокочастотных приборов, расположенных на полупроводниковой пластине. Одной из причин самовозбуждения также может быть соединение внутри модуля МП1 оплетки коаксиального антивибрационного кабеля со средней оплеткой (защитным экраном) основного триаксиального кабеля [4]. Для уменьшения токов утечки в измерительной цепи [5] потенциал защитного экрана поддерживается равным потенциалу центрального проводника триаксиального кабеля с помощью «следящего» усилителя, выходное сопротивление и инерционные свойства которого не позволяют осуществить идеальное «заземление» защитного экрана по высокочастотному переменному сигналу.

Заметим, что измерения собранных в корпусе высокочастотных транзисторов с помощью экранированного контактирующего устройства УК1, входящего в комплект ИППП-1 и подсоединяемого к измерительному прибору только триаксиальными кабелями, не вызывают каких-либо проблем.

Для обеспечения повторяемости результатов измерений высокочастотных транзисторов на полупроводниковых пластинах мы заменили антивибрационные кабели модуля МП1 на типовые коаксиальные кабели с 50-омным волновым сопротивлением и минимальной длиной; оплетка коаксиальных кабелей соединена с внешней оплеткой триаксиальных кабелей — шиной нулевого потенциала; непосредственно на зондодержателях размещены RC-фильтры, параметры ко-



Рис. 1. Измерительный комплекс, включающий ИППП-1 и ЭМ-6040



Рис. 2. Расположение RC-фильтра на зондодержателе

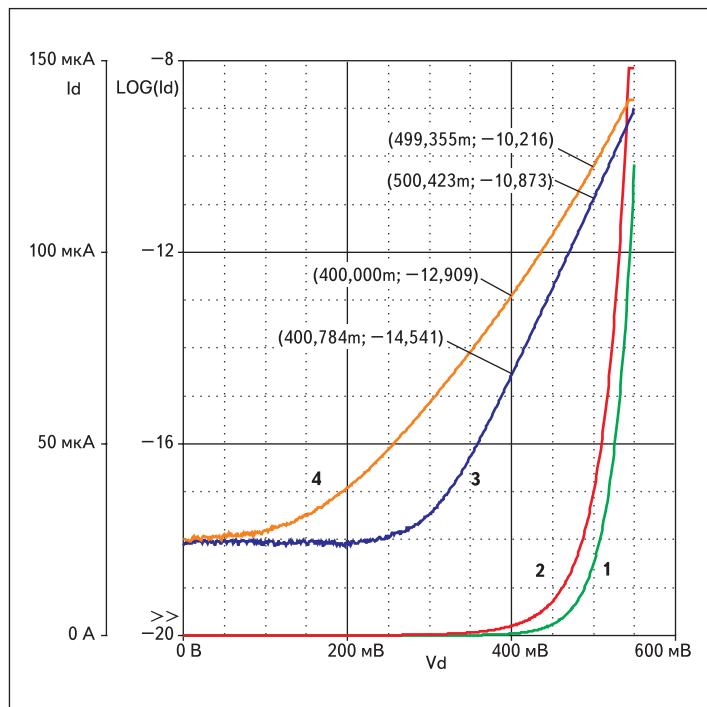


Рис. 3. Зависимости тока диодов (кривые 1, 2) и натурального логарифма тока диодов (кривые 3, 4) от напряжения прямого смещения, полученные с использованием Probe

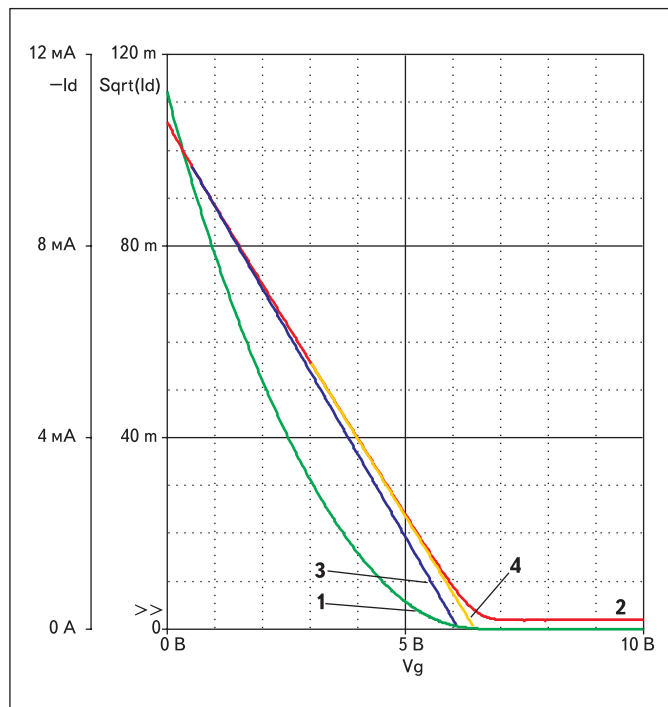


Рис. 4. Зависимости тока стока (кривая 1) и квадратного корня из тока стока (кривая 2) от напряжения «затвор–исток» ПТП, полученные с использованием Probe

торых установлены экспериментальным путем при регистрации ВАХ в широком диапазоне рабочих токов и напряжений [6]. Так, выбор номиналов  $R = 62 \text{ Ом}$ ,  $C = 100 \text{ пФ}$  позволил получить неискаженные ВАХ  $n-p-n$ -транзистора с граничной частотой более 4 ГГц в диапазоне коллекторных токов от 2 мкА до 5 мА. Расположение модуля присоединительного МПП на зондовой установке ЭМ-6040 и RC-фильтра на зондодержателе показано на рис. 1–2, а в работе [6] подробно рассмотрено влияние параметров RC-фильтров на ВАХ.

Выполнить математическую обработку позволяет созданная нами программа, преобразующая результаты измерений прибора ИППП-1 в *csd*-формат, который можно импортировать графическим постпроцессором *Probe*.

Графический постпроцессор *Probe* был выбран для обработки результатов измерений по двум причинам. Во-первых, он является составной частью системы проектирования *OrCad 10*, которая широко применяется для схемотехнического моделирования аналоговых и цифровых схем, синтеза ПЛИС, проектирования печатных плат. Во-вторых, *Probe* позволяет отображать на оси  $Y$  одну или несколько переменных или математических выражений с использованием следующих основных операций:

- $+$ ,  $-$ ,  $\times$ ,  $/$  — арифметические операции;
- $ABS(x)$  — абсолютное значение переменной  $x$ ;
- $SQRT(x)$  — корень квадратный из  $x$ ;
- $EXP(x)$  — экспонента  $x$ ;
- $LOG(x)$  — натуральный логарифм  $x$ ;

- $LOG10(x)$  — десятичный логарифм  $x$ ;
- $PWR(x,y)$  — степенная функция  $x^y$ ;
- $d(y)$  — производная от переменной  $y$  по переменной, отображаемой на оси  $X$ ;
- $s(y)$  — интеграл от переменной  $y$  по переменной, отображаемой на оси  $X$ ;
- $AVG(y)$  — текущее среднее значение переменной  $y$ ;
- $RMS(y)$  — текущее среднее квадратическое значение переменной  $y$ ;
- $DB(x)$  — значение переменной  $x$  в децибелах;
- $MIN(x)$  — минимальное значение переменной  $x$ ;
- $MAX(x)$  — максимальное значение переменной  $x$  и др.

Графический интерфейс программы *Probe* существенно упрощает работу, так как позволяет: одновременно отобразить в одном «окне» результаты измерений из двух и более файлов; изменить различными способами масштаб изображения, в том числе вывести на весь экран часть изображения, охваченного «резиновым» прямоугольником; вывести координаты определенных точек на графиках с помощью электронного курсора; автоматически переместить курсор к следующему локальному (или глобальному) максимуму (или минимуму) на графике; задать диапазоны значений по осям  $X$ ,  $Y$ , выбрать линейные или логарифмические шкалы; нанести на графики текстовые и графические символы (текст, отрезок линии, стрелку, прямоугольник, окружность, эллипс) и многое другое.

Новые возможности прибора ИППП-1 поясняют следующие примеры.

1. По традиционно измеряемым для диодов ВАХ можно определить различие прямого падения напряжения при одинаковом токе, но сделать какие-либо другие выводы по этим характеристикам затруднительно. Совместное использование ИППП-1 и *Probe* позволило отобразить на одном графике (рис. 3) не только зависимости тока (кривые 1, 2) от напряжения прямого смещения диодов, но и зависимости натурального логарифма тока диодов (кривые 3, 4).

Известно, что ток через прямо смещенный диод  $I_D$  зависит от напряжения на нем  $V_D$  как:

$$I_D = IS (\exp(V_D/m\phi_T) - 1), \quad (1)$$

где  $IS$  — обратный ток насыщения диода,  $m$  — фактор, характеризующий отклонение ВАХ  $p-n$ -перехода от экспоненты,  $\phi_T$  — температурный потенциал.

Из (1) следует, что при выполнении условия  $V_D \gg m\phi_T$  наклон ВАХ диода при логарифмическом значении тока определяется соотношением:

$$V_{D2} - V_{D1} \approx m\phi_T (\ln I_{D2} - \ln I_{D1}). \quad (2)$$

Соотношение (2) позволяет рассчитать величину  $m$ -фактора, по отклонению которого от идеального значения, равного единице, допустимо прогнозировать уменьшение надежности и увеличение уровня шумов. Для кривой 3 (рис. 3) величина  $m\phi_T \approx 27,15 \text{ мВ}$ , что близко к теоретическому значению, равному 25,3 мВ, а для кривой 4 величина  $m\phi_T \approx 36,89 \text{ мВ}$ , и такой диод целесообразно забраковать.

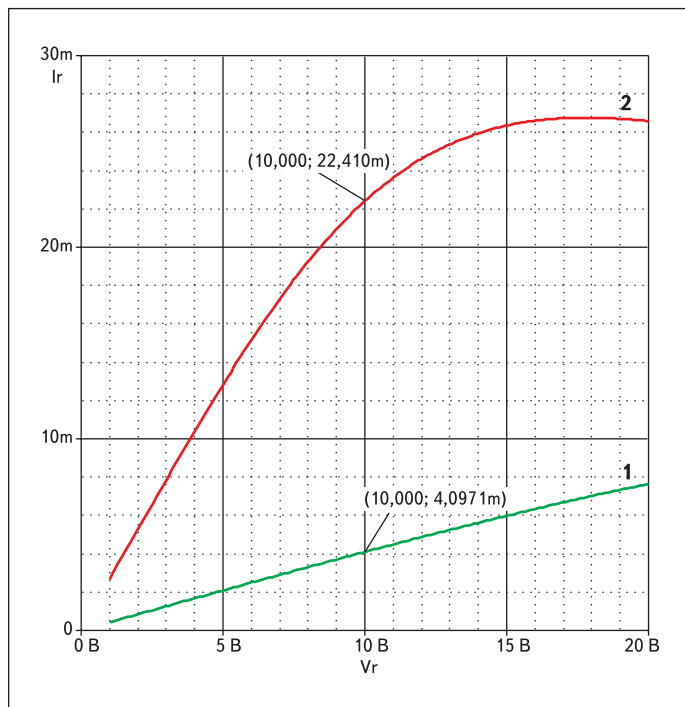


Рис. 5. ВАХ полупроводниковых резисторов с сопротивлением 2,5 кОм (кривая 1) и 450 Ом (кривая 2)

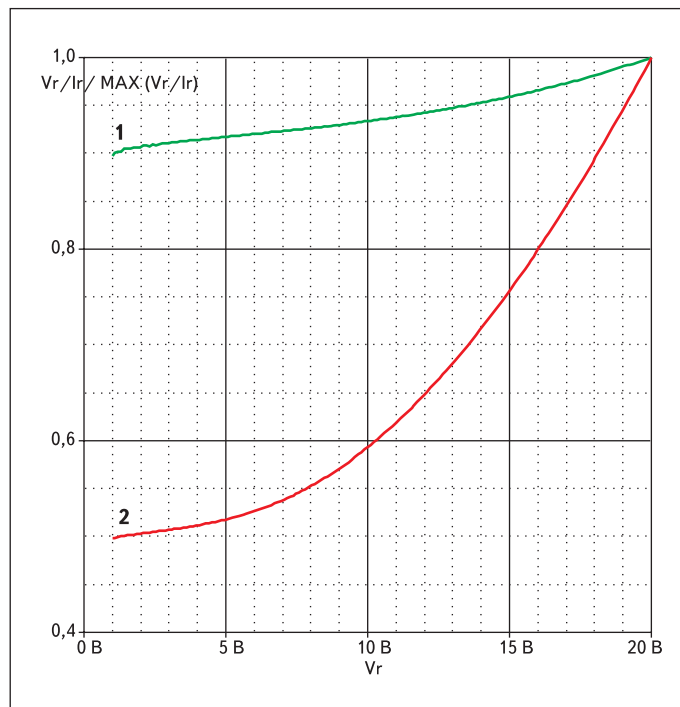


Рис. 6. Зависимости от напряжения сопротивлений полупроводниковых резисторов 2,5 кОм (кривая 1) и 450 Ом (кривая 2), нормированных на максимальное значение

2. Обычно напряжение отсечки полевого транзистора с *p-n*-переходом (ПТП) определяют как напряжение обратного смещенного перехода «затвор–исток», при котором ток стока достигает заданного минимального значения:

$$V_{TO} = V_{GS} \text{ при } I_D = I_{D_{MIN}}, \quad (3)$$

где  $V_{TO}$  — напряжение отсечки,  $V_{GS}$  — напряжение на *p-n*-переходе «затвор–исток»,  $I_D$ ,  $I_{D_{MIN}}$  — ток стока и минимальный ток стока.

Однако идентификация параметра  $V_{TO}$  для схемотехнического моделирования в *Spice*-подобных программах осуществляется иным методом. Исходя из зависимости  $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$  в области насыщения ПТП, напряжение отсечки определяют как точку пересечения касательной к линейной области кривой с осью  $V_{GS}$ , а по наклону этой касательной рассчитывают величину  $\sqrt{BETA}$  ( $BETA$  — удельная крутизна ПТП) [7].

Этот метод основан на модели Шихмана-Ходжеса, в соответствии с которой для области насыщения ПТП справедливо:

$$\sqrt{I_D} \approx \sqrt{BETA} (V_{TO} - V_{GS}). \quad (4)$$

Для мощных ПТП зависимость  $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$  нелинейна вследствие падения напряжения на сопротивлении истока  $R_S$ . В этом случае измерения ВАХ для определения параметров  $V_{TO}$  и  $BETA$  рекомендуется выполнять при малых токах стока. В микромощных ПТП даже при  $V_{GS} \approx 0$  на зависимость  $I_D = f(V_{GS})$  оказывает влияние существование подпоро-

говой области ВАХ, и поэтому для идентификации параметров  $V_{TO}$  и  $BETA$  целесообразно использовать результаты измерений, полученные при небольшом прямом смещении *p-n*-перехода «исток–затвор» (ориентировочно до  $|V_{GS}| < 0,3$  В).

Указанные особенности идентификации параметров ПТП поясняют результаты измерений (рис. 4), выполненных с помощью прибора ИППП-1 и обработанных постпроцессором *Probe*. Возможности графического постпроцессора позволили отобразить на одном графике две оси  $Y$ , одна из которых соответствует току стока  $I_D$  (кривая 1), а вторая — квадратному корню из тока стока (кривая 2), обозначенному в соответствии с принятыми в программе *Probe* правилами как  $Sqrt(I_D)$ . Кроме того, на рис. 4 показаны касательные к линейной области кривой  $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$  в точках  $V_{GS} = 0$  (кривая 3) и  $V_{GS} = 3$  В (кривая 4).

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

- Касательная в точке  $V_{GS} = 3$  В (кривая 4) лучше совпадает с зависимостью  $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$  в широком диапазоне токов, чем касательная при  $V_{GS} = 0$  (кривая 3), что может быть объяснено влиянием сопротивления истока  $R_S$  на ВАХ в области большого тока стока.
- Напряжение отсечки, наиболее удовлетворяющее модели Шихмана-Ходжеса, следует определять как точку пересечения кривой 4 с осью  $V_{GS}$ . Оно составляет 6,42 В, отличается от значения, измеренного в соответствии с выражением (3) (кривая 1,  $V_{TO} = 6,556$  В), и не совпадает с величи-

ной, определяемой касательной в точке  $V_{GS} = 0$  В (кривая 3,  $V_{TO} = 6,0585$  В).

3 ИППП-1 и *Probe* позволяют эффективно исследовать нелинейность ВАХ различных полупроводниковых приборов. Так, на рис. 5 показаны ВАХ полупроводниковых резисторов с сопротивлением 2,5 кОм (кривая 1) и 450 Ом (кривая 2).

Очевидно, что сопротивление полупроводникового резистора зависит от падения напряжения на нем, но по кривым, приведенным на рис. 5, затруднительно определить коэффициент  $VCR$  (*voltage coefficient of resistance*), характеризующий нелинейность ВАХ резисторов:

$$VCR = (R(V) - R(0))/V, \quad (5)$$

где  $R(V)$ ,  $R(0)$  — сопротивление резистора при напряжении, равном  $V$ , и нулевом напряжении.

Указанная задача решается при построении зависимостей от напряжения сопротивлений полупроводниковых резисторов, нормированных на максимальное значение (кривые 1, 2 на рис. 6). На оси  $Y$  рис. 6 отображено выражение  $Vr/Ir / MAX(Vr/Ir)$ , соответствующее в *Probe* соотношению  $R(V)/R_{MAX}$ , из которого можно определить коэффициент  $VCR$ , а при необходимости — зависимость  $VCR(V)$ .

Таким образом, совместное применение прибора ИППП-1 и графического постпроцессора *Probe* предоставляет уникальные возможности по оперативному контролю качества технологических процессов изготовления микросхем и исследованию различных полупроводниковых приборов. ■

## Литература

1. Абрамов И. И., Дворников О. В. Тенденции и проблемы проектирования прецизионных аналоговых интерфейсов // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 10.
2. Лисенков Б. Н. Измеритель параметров полупроводниковых приборов ИППП-1. Минск: ОАО «МНИПИ», 2006.  
[http://www.mnipi.by/Docs/ippp1-Brief\\_information.zip](http://www.mnipi.by/Docs/ippp1-Brief_information.zip)
3. Лисенков Б. Н., Бруёк А. А. Программное обеспечение LIDER. Минск: ОАО «МНИПИ», 2006.  
<http://www.mnipi.by/Docs/lider.zip>
4. Измеритель параметров полупроводниковых приборов ИППП-1. Руководство по эксплуатации.
5. Дворников О. В. Проблемы проектирования аналоговых устройств с входными полевыми транзисторами // Компоненты и технологии. 2005. № 6.
6. Дворников О. В., Лисенков Б. Н., Шульгевич Ю. Ф. Особенности измерений высокочастотных биполярных транзисторов на полупроводниковых пластинах. Минск: ОАО «МНИПИ», 2007.  
[http://www.mnipi.by/Docs/IPPP\\_1\\_features\\_1.zip](http://www.mnipi.by/Docs/IPPP_1_features_1.zip)
7. Абрамов, И. И., Дворников О. В. Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем. Минск: Акад. упр. при Президенте РБ, 2006.