

СОВРЕМЕННЫЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АНАЛИЗА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ



О.В. Дворников,
главный специалист
ОАО «МНИПИ»,
канд. техн. наук,
доцент



Б.Н. Лисенков,
старший
научный сотрудник
ОАО «МНИПИ»



Ю.Ф. Шульгевич,
инженер
Национального центра
физики частиц
и высоких энергий



А.В. Толкун,
магистрант
Белорусского
государственного
университета
информатики и
радиоэлектроники

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 широко используются анализаторы параметров полупроводниковых приборов (*semiconductor parameter analyzer*), которые позволяют выполнять автоматизированные измерения вольтамперных 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.

ОАО «МНИПИ» в 2005 г. начат серийный выпуск и поставки потребителям первого отечественного прибора такого типа — измерителя параметров полупроводниковых приборов (ИППП-1), который включает до четырех программируемых от внешнего компьютера источников-измерителей, в том числе для четырехпроводной схемы измерения, и пакет программ предварительной обработки результатов измерений [2, 3]. ИППП-1 отличается от ближайших зарубежных аналогов (4155 фирмы *Agilent*, 4200-SCS фирмы *Keithley*) значительно меньшей (в 3–10 раз) стоимостью [4].

Апробация ИППП-1 при измерениях различных интегральных элементов, в том числе биполярных транзисторов с граничной частотой более 4 ГГц, позволила установить, что

целесообразно адаптировать ИППП-1 к современным зондовым установкам, например, зондовой аналитической установке ЭМ-6040 [5], и существенно расширить возможности математической обработки результатов измерений. Главной проблемой при модернизации ИППП-1 был поиск технических решений, не увеличивающих значительно стоимость изделия, для чего:

- доработаны кабели, соединяющие присоединительный модуль МП1, входящий в комплект ИППП-1, с зондодержателями установки ЭМ-6040;

- непосредственно на зондодержателях размещены RC-фильтры;

- разработана программа, преобразующая результаты измерений ИППП-1 в *csd*-формат, благодаря чему их можно импортировать и обрабатывать графическим постпроцессором Probe пакета программ *OrCad 10*.

Измерительный комплекс, включающий ИППП-1 и ЭМ-6040, приведен на рис. 1. На рис. 2 показано размещение RC-фильтров, постоянную времени которых необходимо выбирать таким образом, чтобы, с одной стороны, исключить самовозбуждение измеряемых полупроводниковых приборов во всем диапазоне рабочих токов и напряжений, а с другой сторо-



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

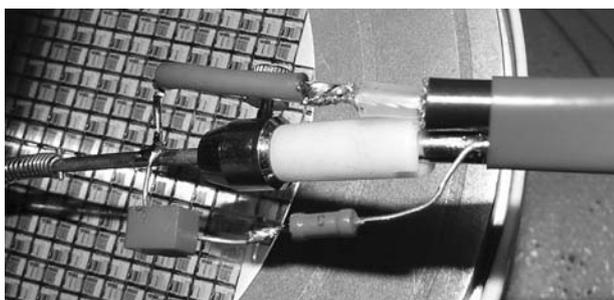


Рис. 2. Расположение RC-фильтров на зондодержателях

ны, не допустить существенного шунтирующего влияния RC-фильтров на ВАХ в микрорежиме.

Графический постпроцессор *Probe* был выбран для обработки результатов измерений по двум причинам. Во-первых, он является составной частью пакета программ *OrCad 10*, который широко применяется для схемотехнического моделирования аналоговых и цифровых схем, синтеза ПЛИС, проектирования печатных плат, и поэтому пользователям прибора ИППП-1 не потребуется закупать новое программное обеспечение. Кроме того, они знакомы с методикой работы в *Probe*. Во-вторых, *Probe* позволяет отображать на оси Y одну или несколько переменных или математических выражений с использованием следующих основных операций: +, -, ×, / — 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 среднеквадратическое значение переменной *y*; *DB(x)* — значение переменной *x* в децибелах; *MIN(x)* — минимальное значение переменной *x*; *MAX(x)* — максимальное значение переменной *x* и др.

Новые возможности прибора ИППП-1 поясняют следующие примеры.

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:

$$V_{TO} = V_{GS} \text{ при } I_D = I_{DMIN}, \quad (1)$$

где V_{TO} — напряжение отсечки (для *p*-ПТП — положительная величина), V_{GS} — напряжение на *p-n*-переходе «затвор — исток», I_D , I_{DMIN} — ток стока и минимальный ток стока.

Однако идентификация V_{TO} для схемотехнического моделирования в «*Spice*-подобных» программах осуществляется с помощью иного метода. Исходя из зависимости $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$ в области насыщения ПТП, напряжение отсечки определяют как точку пересечения касательной к линейной области кривой $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$

с осью V_{GS} , а по наклону этой касательной рассчитывают величину \sqrt{BETA} ($BETA$ — удельная крутизна ПТП) [6].

Эта метод основан на модели Шихмана — Ходжеса, в соответствии с которой для области насыщения ПТП справедливо выражение:

$$\sqrt{I_D} \approx \sqrt{BETA} (V_{TO} - V_{GS}). \quad (2)$$

Для мощных ПТП зависимость $\sqrt{I_D} = f(V_{GS})$ нелинейна вследствие падения напряжения на сопротивлении истока RS . В этом случае измерения ВАХ для определения параметров V_{TO} , $BETA$ 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 подпороговой области ВАХ, и поэтому для идентификации параметров V_{TO} , $BETA$ 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. 3), выполненных с помощью прибора ИППП-1 и обработанных *Probe*. Возможности графического постпроцессора позволили отобразить на одном графике две оси Y, одна из ко-

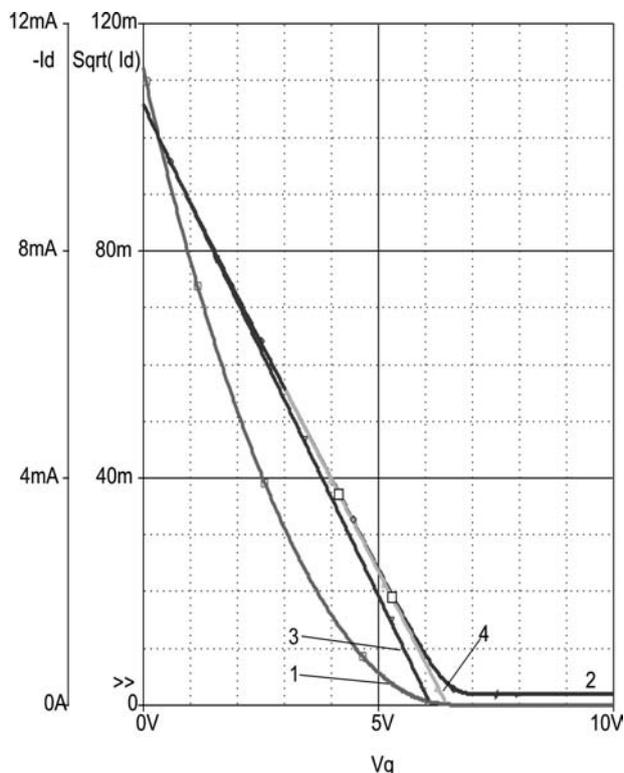


Рис. 3. Зависимость тока стока (кривая 1) и квадратного корня из тока стока (кривая 2) от напряжения затвор-исток ПТП

торых 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. 3 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 RS 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 (1) (кривая 1, $V_{TO} = 6,5556$ В), и не совпадает с величиной, определяемой касательной в точке $V_{GS} = 0$ В (кривая 3, $V_{TO} = 6,0585$ В).

Совместное применение ИППП-1 и *Probe* может быть весьма полезным при анализе полупроводниковых диодов. На рис. 4 приведена традиционно измеряемая зависимость тока (кривые 1, 2) от напряжения прямого смещения для двух диодов КД2978. Очевидно, что прямое падение напряжения на диодах при одинаковом токе немного отличается, но сделать какие-либо другие выводы по этих характеристикам затруднительно. В то же время на рис. 4 показаны зависимости натурального логарифма тока диода (кривые 3, 4). Известно, что ток через прямо смещенный диод I_D зависит от напряжения на нем V_D в соответствии с выражением:

$$I_D = IS \left(\exp \frac{V_D}{m\phi_T} - 1 \right), \quad (3)$$

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

Из выражения (3) следует, что при выполнении условия $V_D \gg m\phi_T$ наклон ВАХ диода при логарифмическом значении тока определяется соотношением:

$$V_{D2} - V_{D1} \approx m\phi_T (\ln I_{D2} - \ln I_{D1}). \quad (4)$$

Соотношение (4) позволяет рассчитать величину m -фактора, по отклонению которого от идеального значения, равного единице, допусти-

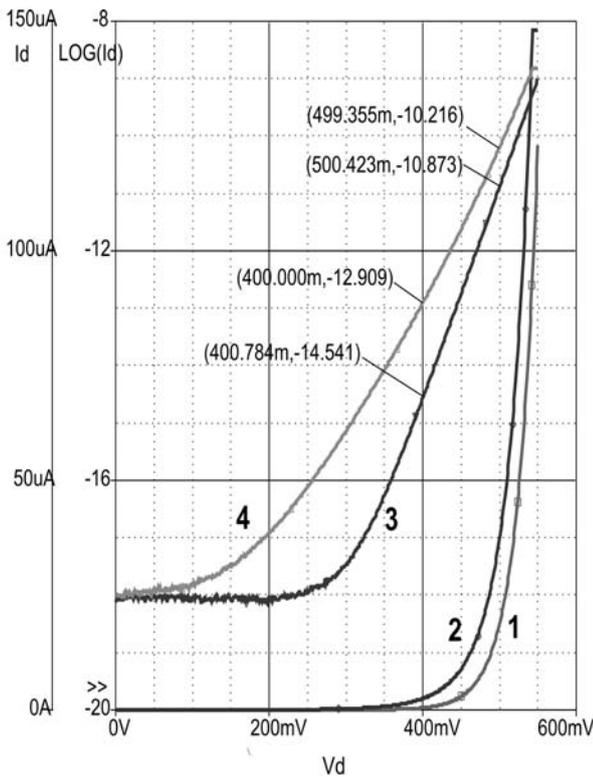


Рис. 4. Зависимость тока диода (кривая 1, 2) и натурального логарифма тока диода (кривая 3, 4) от напряжения прямого смещения

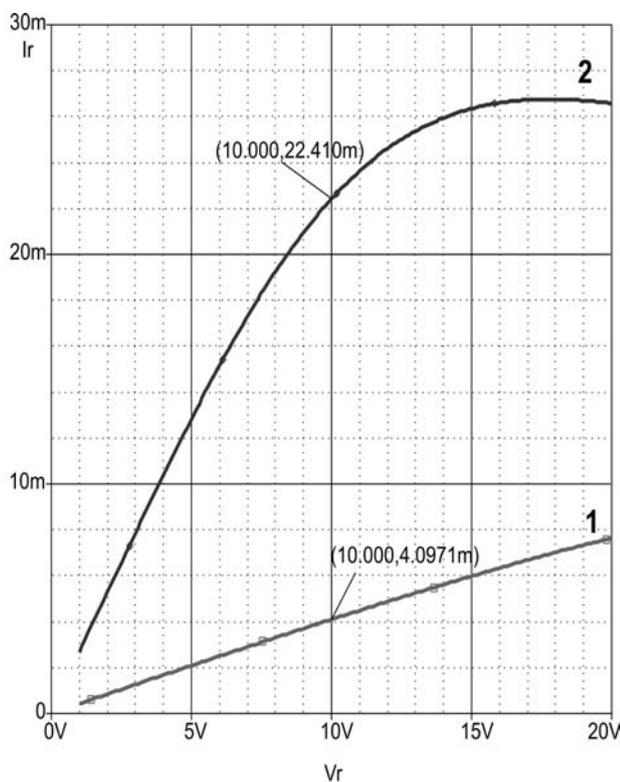


Рис. 5. ВАХ полупроводниковых резисторов с сопротивлением 2,5 кОм (кривая 1) и 450 Ом (кривая 2)

мо прогнозировать уменьшение надежности и увеличение уровня шумов. Для кривой 3 (рис. 4) величина $m\phi_T \approx 27,15$ мВ, что близко к теоретическому значению, равному 25,3 мВ, а для кривой 4 (рис. 4) величина $m\phi_T \approx 36,89$ мВ и такой диод целесообразно забраковать.

ИППП-1 и Probe позволяют эффективно исследовать нелинейность ВАХ различных полупроводниковых приборов. Например, на рис. 5 показаны ВАХ полупроводниковых резисторов с сопротивлением 2,5 кОм (кривая 1) и 450 Ом (кривая 2). Очевидно, что сопротивление полупроводниковых резисторов 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:

$$VCR = \frac{R(V) - R(0)}{V}, \quad (5)$$

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 отображено выражение $V_r/I_r/\text{MAX}(V_r/I_r)$

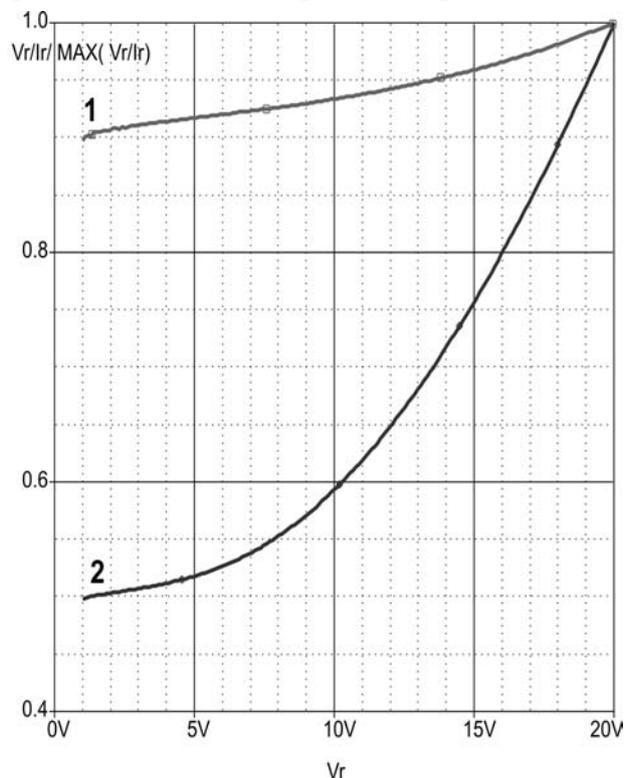


Рис. 6. Зависимости от напряжения сопротивлений полупроводниковых резисторов 2,5 кОм (кривая 1) и 450 Ом (кривая 2), нормированных на максимальное значение

$MAX(Vr/Ir)$, соответствующее в *Probe* соотношению $R(V)/R_{MAX}$, из которого можно определить коэффициент VCR , а при необходимости — зависимость $VCR(V)$.

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

Литература:

1. Абрамов, И.И. Тенденции и проблемы проектирования прецизионных аналоговых интерфейсов / И.И. Абрамов, О.В. Дворников // Нано- и микросистемная техника. — 2005. — № 10. — С. 23–35.

2. Лисенков, Б.Н. Измеритель параметров полупроводниковых приборов ИППП-1 [Электронный ресурс] / Б.Н. Лисенков, А.А. Бруёк; ОАО «МНИПИ». — Минск, 2006. — 2 с. — Режим доступа: http://www.mnipi.by/Docs/ipp1-Brief_information.zip.

3. Лисенков, Б.Н. Программное обеспечение “LIDER” [Электронный ресурс] / Б.Н. Лисенков, А.А. Бруёк; ОАО «МНИПИ». — Минск, 2006. — 15 с. — Режим доступа: <http://www.mnipi.by/Docs/lider.zip>.

4. <http://www.mnipi.by/price.html>

5. <http://www.planar.by/ru/production/page18/em-6040a/>

6. Абрамов, И.И. Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем / И.И. Абрамов, О.В. Дворников. — Минск: Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2006. — 286 с.