

# Масштабируемая макромодель диода с повышенной точностью моделирования

А.С. Мокеев, А.Н. Мансуров, А.П. Ятманов

ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седякова», [aYatmanov@niis.nnov.ru](mailto:aYatmanov@niis.nnov.ru)

**Аннотация** — В статье приводится описание стандартной SPICE-модели диода на основе p-n перехода — DIODE. Определены основные характеристики модели, выявлен ряд недостатков. Разработана макромодель «DIODE-SCALE», масштабируемая по топологическому параметру ширины базы диода и обладающая повышенной точностью. Проведена экстракция SPICE-параметров макромодели «DIODE-SCALE».

**Ключевые слова** — SPICE-модель, диод, макромодель, масштабирование, экстракция параметров.

## I. ВВЕДЕНИЕ

К микросхемам, входящим в состав электронной аппаратуры специального назначения, предъявляются требования по стойкости к воздействию внешних факторов, в том числе к воздействию статического электричества.

Для достижения этих требований в блоках ввода/вывода микросхем применяются схемы, обеспечивающие толерантность к повышенному уровню входных напряжений и схемы ESD-защиты (ESD – ElectroStatic Discharge – электростатический разряд), основным элементом которых является диод на основе p-n перехода. В настоящее время проектирование микросхем осуществляется с помощью САПР (систем автоматизированного проектирования), таких как Cadence, ADS, в которых используются программы схемотехнического моделирования. На этапе моделирования электрической схемы существует острая необходимость в точных компактных SPICE-моделях диодов, масштабируемых по топологическим параметрам во всем диапазоне значений, предусмотренных правилами проектирования для конкретного технологического процесса.

Стандартная компактная SPICE-модель (DIODE) диода, реализованного по КМОП КНИ технологии с проектными нормами 0.35 мкм (КНИ – кремний на изоляторе), обладает рядом существенных недостатков:

- неприемлемо низкая точность моделирования вольт-амперной характеристики (ВАХ) устройства (рис. 1, 2);
- модель не масштабируема по параметру ширины базы диода (*hwell*) (рис. 3) [1];

– модель не учитывает эффект модуляции сопротивления базы [2], эффект рекомбинации в области пространственного заряда (ОПЗ) при малых прямых напряжениях [3], процессы прямого и обратного восстановления [4].

В связи с этим актуальна разработка новой высокоточной SPICE-модели диода, в которой отсутствуют вышеописанные недостатки.

## II. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ DIODE

### A. Описание модели DIODE

DIODE – стандартная SPICE-модель кремниевого диода на основе p-n перехода. Данная модель поддерживается симулятором (программой моделирования) Spectre фирмы Cadence [5], и включает в себя две модели: level-1 и level-2, выбор между которыми осуществляется с помощью параметра *level*. Модель level-1 описывает прямую и обратную ВАХ, пробой, паразитное сопротивление, барьерную и диффузионную емкости, емкость перекрытия и шумы. Модель level-2 используется для моделирования туннельного тока по Фаулеру-Нордгейму в очень тонких слоях диэлектриков, таких как диоксид кремния [1].

Модель DIODE является масштабируемой по таким параметрам устройства (Instance Parameters) как *l*, *w*, *m* – длина, ширина p-n перехода и коэффициент мультипликации, соответственно. В стандартной модели нет параметра ширины базы, который является критичным при высоком уровне инжекции неосновных носителей в диодах с узкой базой [2].

### B. Экстракция параметров компактной модели «DIODE»

В данной работе проведена экстракция SPICE-параметров стандартной модели диода, реализованного по КМОП КНИ технологии с проектными нормами 0.35 мкм. Экстракция проводилась с помощью САПР Agilent IC-CAP 2010.08 [6] с внешне подключенным симулятором Spectre фирмы Cadence на рабочих станциях с операционной системой CentOS. Исходными данными для процесса экстракции являлись информация о техпроцессе и результаты приборно-технологического моделирования (ПТМ) диода с размерами  $W/L = 8\text{мкм}/0.175\text{мкм}$ . ПТМ проводилось с использованием САПР TCAD фирмы Synopsys [7]. На рис. 1, 2



с помощью диода  $ds$  (модель  $dsat$ ). Для корректного моделирования обратной ветви ВАХ диода (в частности, области пробоя) в схему макромодели вводятся дополнительные элементы: стандартный диод  $dr$  (модель  $drev$ ) и резистор  $rsrev$ . Для описания частотных свойств диода использованы пассивные компоненты:  $lsa, ca0, ra0$  – для цепи анода,  $lsc, cc0, rc0$  – для цепи катода.

Алгоритм параметризации макромодели диода:

- 1) Выбирается стандартная SPICE-модель элемента СБИС, поддерживаемая программой-симулятором (DIODE).
- 2) Формируется макромодель.
- 3) В net-лист макромодели в качестве дополнительного параметра устройства вводятся пользовательские параметры ширины базы ( $hwell$ ) и глубины залегания  $p^+$ - $n$  перехода ( $xj$ ).
- 4) Проводятся исследования электрофизических характеристик (ЭФХ) тестовых структур.
- 5) Проводится анализ полученных ЭФХ, определяется зависимость отдельных параметров макромодели от параметра  $hwell$ .
- 6) Выбирается аппроксимирующая функция для данной зависимости.
- 7) В net-листе макромодели необходимый параметр выражается через аппроксимирующую функцию, а ее коэффициенты вводятся в качестве дополнительных параметров масштабирования.

#### IV. ЭКСТРАКЦИЯ SPICE-ПАРАМЕТРОВ МАКРОМОДЕЛИ «DIODE-SCALE»

##### A. Исходные данные

Параметры технологического процесса:

- глубина залегания  $p^+$ - $n$  перехода ( $xj$ ) = 175 нм;
- концентрация легирующей примеси  $p^+$ -области ( $N_a$ ) =  $1.7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ;
- концентрация легирующей примеси  $n$ -области ( $N_d$ ) =  $7.0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Топологические параметры устройства:

- ширина  $p^+$ - $n$  перехода ( $w$ ) = 1 мкм;
- ширина базы диода ( $hwell$ ) = от 0.4 мкм до 1 мкм;
- площадь  $p^+$ - $n$  перехода ( $area$ ) задается выражением

$$area = w * xj.$$

ЭФХ полосковых  $p^+$ - $n$  диодов, необходимые для экстракции SPICE-параметров, были получены в результате ПТМ в САПР TCAD элементов КМОП КНИ СБИС с проектными нормами 0.35 мкм. На рис. 5 представлены структуры диодов с различной шириной базы ( $hwell$ ).

##### B. Последовательность экстракции SPICE-параметров макромодели «DIODE-SCALE»

Последовательность экстракции DC SPICE-параметров описана в табл. 1. Прямую ветвь ВАХ диода можно разбить на 4 участка (рис. 6):

- 1) участок малых токов (не принимается во внимание, т.к. определяется разрешающей способностью измерительного оборудования);
- 2) участок с преобладанием рекомбинации в ОПЗ эмиттерного перехода;
- 3) участок с преобладанием процесса инжекции;
- 4) участок, связанный с модуляцией сопротивления базы при высоком уровне инжекции;
- 5) омический участок.

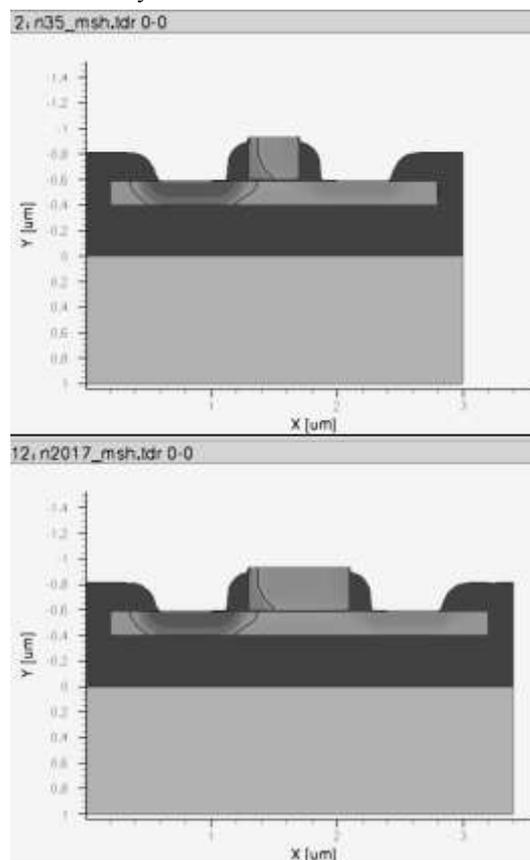


Рис. 5. Структуры  $p^+$ - $n$  диодов с различной шириной базы ( $hwell$ )

Экстракция SPICE-параметров макромодели «DIODE-SCALE» проводилась с помощью САПР Agilent IC-CAP 2010.08 с внешне подключенным симулятором Spectre. DC, емкостные и температурные параметры макромодели «DIODE-SCALE» извлекаются с помощью оптимизационных алгоритмов САПР IC-CAP и программ на языке PEL (Parameter Extraction Language). Дополнительные параметры масштабирования извлекаются путем аппроксимации зависимостей модельных параметров от ширины базы диода ( $hwell$ ).

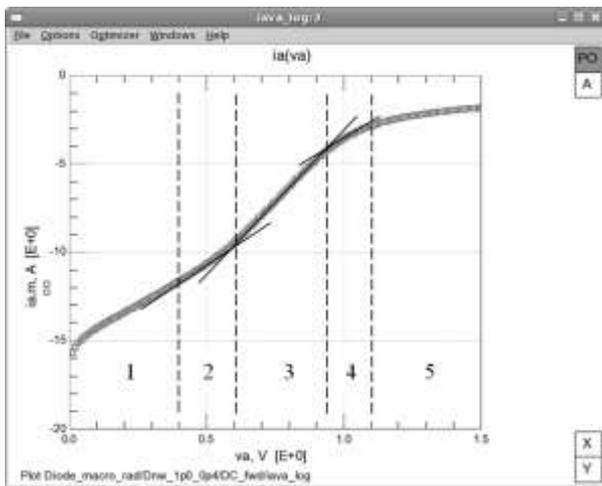


Рис. 6. Участки прямой ветви ВАХ диода (полулогарифмический масштаб)

Таблица 1

Последовательность экстракции SPICE-параметров макромодели «DIODE-SCALE»

| №                              | ЭФХ  | Экстрагируемые SPICE-параметры   |
|--------------------------------|--|--|
| <i>DC-параметры</i>            |  |  |
| 1                              | прямая ветвь ВАХ, участок 3                | <i>dmain.js, dmain.n</i>   |
| 2                              | прямая ветвь ВАХ, участок 2                | <i>dlow.js, dlow.n, dlow.gleak</i>   |
| 3                              | прямая ветвь ВАХ, участок 4, 5             | <i>dsat.n<sup>1)</sup>, dsat.rs<sup>1)</sup>, dsat.js<sup>1)</sup></i>       |
| 4                              | обратная ветвь ВАХ                         | <i>drev.js, drev.n, drev.rs, drev.bv, drev.ibv, dmain.gleak<sup>1)</sup></i> |
| <i>Емкостные параметры</i>     |  |  |
| 5                              | ВФХ  | <i>dmain.vj, dmain.fc, dmain.mj, dmain.m</i>                                 |
| 6                              | ВФХ  | <i>dmain.cj<sup>1)</sup></i>   |
| <i>Температурные параметры</i> |  |  |
| 7                              | прямая ветвь ВАХ                           | <i>dmain.xti, dmain.eg, dsat.xti, dsat.eg</i>                                |
| 8                              | прямая ветвь ВАХ                           | <i>dsat.trs</i>  |
| 9                              | обратная ветвь ВАХ                         | <i>drev.xti, dlow.tgs</i>  |
| 10                             | ВФХ  | <i>dmain.tlevc, dmain.cta, dmain.pta</i>                                     |
| <i>S-параметры</i>             |  |  |
| 11                             | $S_{xx}(\text{freq}), S_{xy}(\text{freq})$ | <i>lsa.l, ca0.c, ra0.r, lsc.l, cc0.c, rc0.r</i>                              |
| 12                             | $S_{xx}(\text{freq}), S_{xy}(\text{freq})$ | <i>dmain.tt</i>  |

<sup>1)</sup> Данный параметр извлекается (задается) для каждого значения ширины базы диода (*hwell*).

Прямая ветвь ВАХ диода при малых напряжениях описывается уравнением вида:

$$i_D = I_S * e^{\frac{v_D}{N * v_T}}, \quad (1)$$

где  $I_S$  – ток насыщения,  $N$  – фактор неидеальности,  $v_T$  – тепловой потенциал.

Прологарифмируем обе части уравнения (1):

$$\lg i_D = \lg I_S + \left( \frac{1}{2.3 * N * v_T} \right) * v_D.$$

Полученное уравнение имеет линейный вид:

$$y = b + m * x, \quad (2)$$

где  $y = \lg i_D$ ,  $b = \lg I_S$ ,  $m = \frac{1}{2.3 * N * v_T}$ ,  $x = v_D$ .

Участок 3 прямой ветви ВАХ описывается с помощью диода *dio* макромодели «DIODE-SCALE» (рис. 6). Таким образом, для определения параметров *dmain.js*, *dmain.n* модели диода *dio* необходимо:

- 1) провести линеаризацию прямой ветви ВАХ диода (логарифмированием значений тока анода *ia*);
- 2) аппроксимировать участок 3 ВАХ линейной функцией (рис. 7);
- 3) выразить параметры  $I_S$ ,  $N$  через коэффициенты аппроксимирующей функции  $m$  и  $b$ ;
- 4) присвоить экстрагируемым параметрам макромодели полученные значения:  $dmain.js = \frac{I_S}{\text{area}}$ ,  $dmain.n = N$ .

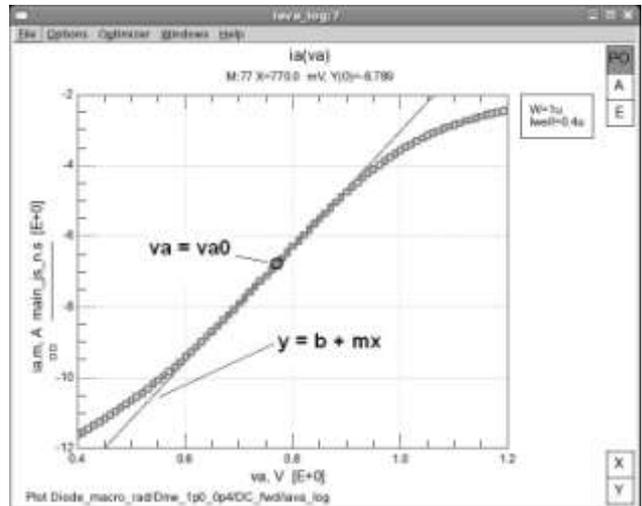


Рис. 7. Определение уравнения линеаризованного участка ВАХ методом касательной

Параметр макромодели диода *dsat.js* задается выражением:  $dsat.js = \frac{A}{hwell}$ .

В результате анализа ЭФХ диодов определены зависимости ряда параметров макромодели от ширины базы. Топологические размеры диодов:  $w = 1 \mu\text{м}$ ,  $hwell = 0.4 \div 1 \mu\text{м}$ , шаг  $0.1 \mu\text{м}$ .

Получены следующие аппроксимирующие уравнения, описывающие зависимость параметров макромодели диода от ширины базы:

$$dsat.n = B1 + B2 * hwell,$$

$$dsat.rs = C1 + C2 * hwell,$$

$$dmain.gleak = D1 + D2 * hwell,$$

$$dmain.cjo = E1 + E2 * hwell.$$

Графики зависимостей и аппроксимирующих функций представлены на рис. 8-11.

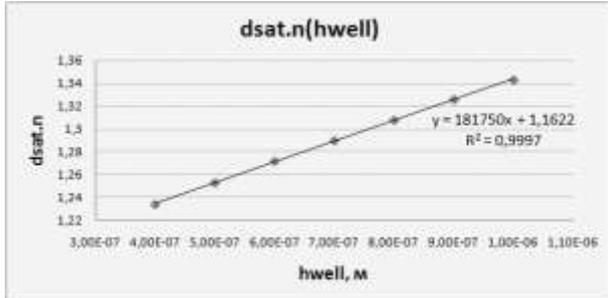


Рис. 8. График зависимости параметра  $dsat.n$  от ширины базы  $hwell$

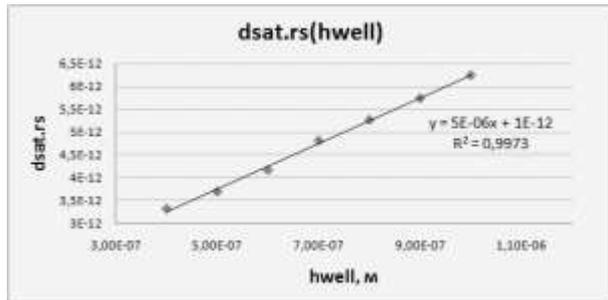


Рис. 9. График зависимости параметра  $dsat.rs$  от ширины базы  $hwell$

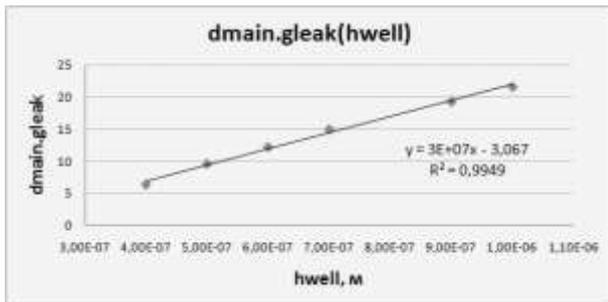


Рис. 10. График зависимости параметра  $dmain.gleak$  от ширины базы  $hwell$

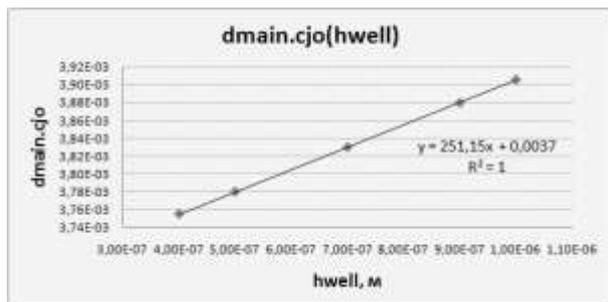


Рис. 11. График зависимости параметра  $dmain.cjo$  от ширины базы  $hwell$

Экстракция температурных SPICE-параметров проводилась из ЭФХ диодов, полученных при температурах: минус 50, минус 20, 27, 85, 125°C.

Извлеченные SPICE-параметры масштабирования макромодели диода представлены в табл. 2.

Таблица 2

SPICE-параметры масштабирования макромодели «DIODE-SCALE»

| Параметр | A                     | B1     | B2                | C1                     |
|----------|-----------------------|--------|-------------------|------------------------|
| Значение | 519.68                | 1.16   | 181750            | $1.27 \times 10^{-12}$ |
| Параметр | C2                    | D1     | D2                | E1                     |
| Значение | $4.96 \times 10^{-6}$ | -3.067 | $2.5 \times 10^7$ | 0.0036                 |
| Параметр | E2                    |        |                   |                        |
| Значение | 251.15                |        |                   |                        |

На рис. 12-16 представлены ЭФХ n-карманных диодов с различными топологическими размерами, в том числе при различных температурах среды. Маркерами обозначены результаты ПТМ, сплошной линией – результаты моделирования с использованием экстрагированных SPICE-параметров.

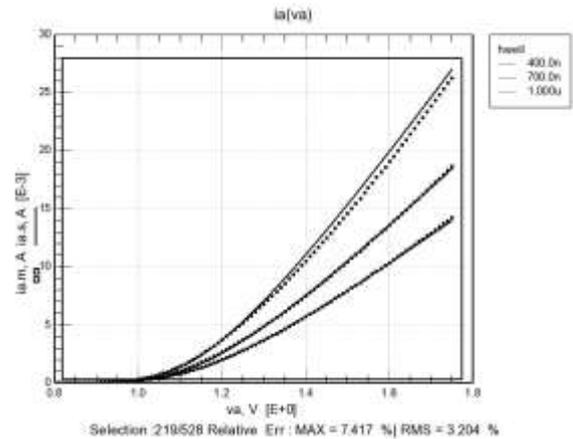


Рис. 12. Прямые ветви ВАХ диодов с различными значениями ширины базы

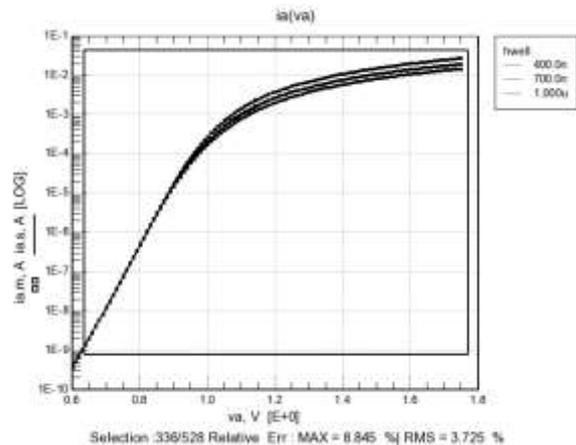


Рис. 13. Прямые ветви ВАХ диодов с различными значениями ширины базы (полулогарифмический масштаб)

## Сравнение стандартной модели «DIODE» и разработанной – «DIODE-SCALE»

| Параметр  | DIODE      |              | DIODE-SCALE |
|---|------------|--------------|-------------|
|   | Прямая VAX | Обратная VAX | Все ЭФХ     |
| Среднеквадратическое значение $\Delta_{\epsilon}$ | 40%        | 90%          | $\leq 10\%$ |
| Масштабируемость по ширине базы                   | -          | -            | +           |
| Эффект модуляции сопротивления базы               | -          | -            | +           |
| Эффект рекомбинации в ОПЗ                         | -          | -            | +           |
| Частотные свойства (S-параметры)                  | -          | -            | +           |

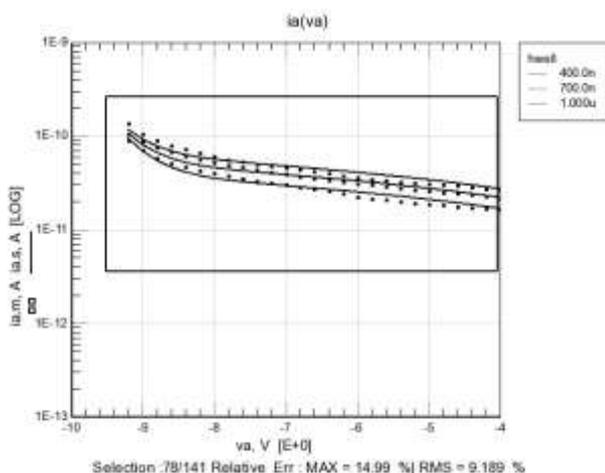


Рис. 14. Обратные ветви ВАХ диодов с различными значениями ширины базы (полулогарифмический масштаб)

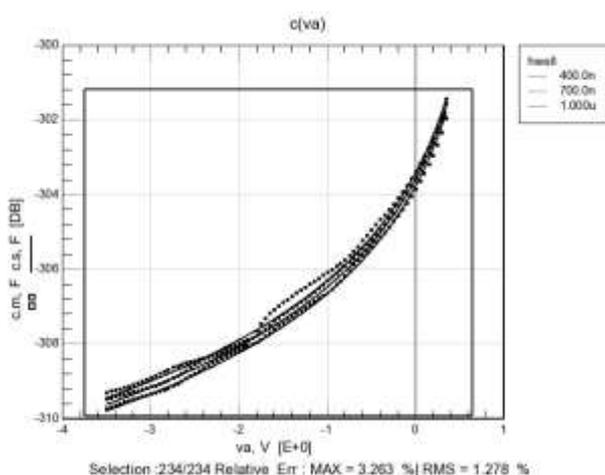


Рис. 15. ВФХ диодов с различными значениями ширины базы

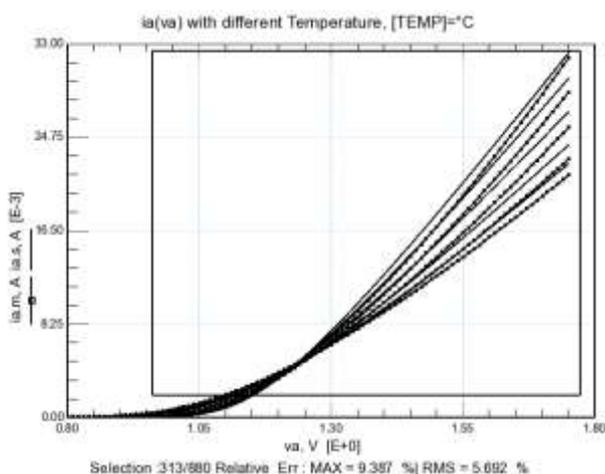


Рис. 16. Прямые ветви ВАХ диода при различных значениях температуры среды

Сравнение стандартной модели «DIODE» и разработанной «DIODE-SCALE» представлено в табл. 3.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена масштабируемая макромодель диода с повышенной точностью моделирования «DIODE-SCALE». Разработаны алгоритмы параметризации и экстракции ее SPICE-параметров. Данная модель диода по техническим характеристикам превосходит стандартную модель «DIODE» и найдет широкое применение при проектировании микросхем, входящих в состав электронной аппаратуры специального назначения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Virtuoso Spectre Circuit Simulator Device Models and Circuit Components / Cadence Design Systems, Inc. - 555 River Oaks Parkway. San Jose, CA 95134, USA. 2004. 1274 p.
- [2] Dieter K. Schroder. Semiconductor material and device characterization. John Wiley & Sons, Inc. - 111 River Street, Hoboken, New Jersey. 2006. 779 p.
- [3] С.В. Булярский, Н.С. Грушко, А.И. Сомов, А.В. Лакалин. Рекомбинация в области пространственного заряда и ее влияние на коэффициент передачи биполярного транзистора // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. № 9. С. 1146-1150.
- [4] Maxim A., Maxim Gh. A novel power PIN diode behavioral SPICE macromodel including the forward and reverse recoveries and the self-heating process // Proceedings of the IEEE APEC'98 Conference. 2000. V. 2. P. 1088-1094.
- [5] Virtuoso Spectre Circuit Simulator User Guide / Cadence Design Systems, Inc. - 555 River Oaks Parkway. San Jose, CA 95134, USA. 2004. 332 p.
- [6] IC-CAP 2011.04. Introduction and Basics / Agilent Technologies, Inc. 2011. 192 p.
- [7] Sentaurus Device User Guide / Synopsys, Inc. 2007. 993 p.
- [8] IC-CAP Learning Week / Agilent Technologies. 2008. 650 p.