

СИНТЕЗ КОМПАКТНОЙ МОДЕЛИ ИНТЕГРАЛЬНОГО РЕЗИСТОРА

М.Н.Петров, И.С.Телина

DEVELOPMENT OF COMPACT MODEL OF AN INTEGRAL RESISTOR

M.N.Petrov, I.S.Telina

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Mikhail.Petrov@novsu.ru

Рассмотрена методика формирования компактной (SPICE) модели интегрального резистора, изготовленного с помощью биполярной технологии на базовом слое транзистора. В отличие от дискретного аналога интегральный резистор характеризуется большим числом параметров, что связано с нелинейной температурной зависимостью его номинала и наличием паразитных элементов в виде барьерной емкости. Процесс формирования макромодели интегрального резистора предполагает экстракцию пяти параметров: линейного и квадратичного температурных коэффициентов и трех параметров, необходимых для описания барьерной емкости. На базе полученной модели выполнен расчет температурной и амплитудно-частотной характеристик интегрального резистора. Предложенная процедура синтеза модели интегрального резистора может быть использована для формирования макромоделей других типов интегральных резисторов: низкоомных, выполненных на эмиттерном слое, и высокоомных — пинч-резисторов.

Ключевые слова: *подсхема, интегральный резистор, макромодель, компактная модель, пинч-резистор*

Для цитирования: *Петров М.Н., Телина И.С. Синтез компактной модели интегрального резистора // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №4(125). С.52-56. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).52-56](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).52-56)*

The article discusses a technique for forming a compact (SPICE) model of an integral resistor manufactured using bipolar technology on the base layer of a transistor. Unlike a discrete analog, an integral resistor is characterized by many parameters, which is associated with the nonlinear temperature dependence of its nominal value and the presence of parasitic elements in the form of a barrier capacitance. The process of forming a macromodel of an integrated resistor involves the extraction of five parameters: linear and quadratic temperature coefficients and three parameters necessary to describe the depletion layer capacitance. Based on the obtained model, the calculation of the temperature and amplitude-frequency characteristics of the integral resistor has been carried out. The proposed procedure for synthesizing the integral resistor model can be used to form macromodels of other types of integral resistors: low-resistance, formed on the emitter layer, and high-resistance — pinch resistors.

Keywords: *subcircuit, integral resistor, macromodel, compact model, pinch resistor*

For citation: *Petrov M.N., Telina I.S. Development of compact model of an integral resistor // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №4(125). P.52-56. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).52-56](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).52-56)*

Введение

При проектировании микросхем каждый ее компонент, в том числе и резисторы, замещаются их эквивалентными схемами [1], которые представляют набор двухполюсных элементов. Такая модель получила название *компактной*. Фактически это виртуальный аналог реального прибора.

Назначение компактной модели — предоставлять потребителям справочный материал о параметрах изготовленного прибора. Кроме того, эта модель используется на этапе схемотехнического проектирования микроэлектронных устройств, в том числе интегральных схем.

Компактная (SPICE) модель интегрального резистора

Компактная модель включает набор параметров, используемых для моделирования прибора в разных режимах работы [2]: статическом (DC), динамическом (для анализа переходного процесса, TR) и частотном (в режиме малого сигнала, AC). Каждому из перечисленных режимов анализа соответствует свой набор параметров.

Необходимость учета паразитных эффектов

Сложность эквивалентной схемы интегрального резистора ИР (рис.1) по сравнению с эквивалентной схемой дискретного резистора (фактически состоящей из одного элемента — самого резистора) обусловлена наличием в его структуре одного или нескольких *p-n*-переходов. Это приводит к необходимости учета паразитных емкостей, а для некоторых конструкций — паразитного транзистора.

Так, в структуре ИР, изготовленного в процессе выполнения базовой диффузии (рис.1а), можно выделить паразитный подложечный *p-n-p*-транзистор (база–коллектор–подложка). Если не принять специальных мер, то наличие такого транзистора может привести к росту токов подложки. Для минимизации этого негативного воздействия необходимо, чтобы паразитный транзистор всегда работал в режиме отсечки. Это достигается конструктивным способом за счет подключения эпитаксиальной *n*-области к точке с наиболее высоким потенциалом (напряжением питания). И поскольку подложка всегда заземлена, оба *p-n*-перехода паразитного транзистора всегда работают в режиме обратного смещения. Потому в экви-

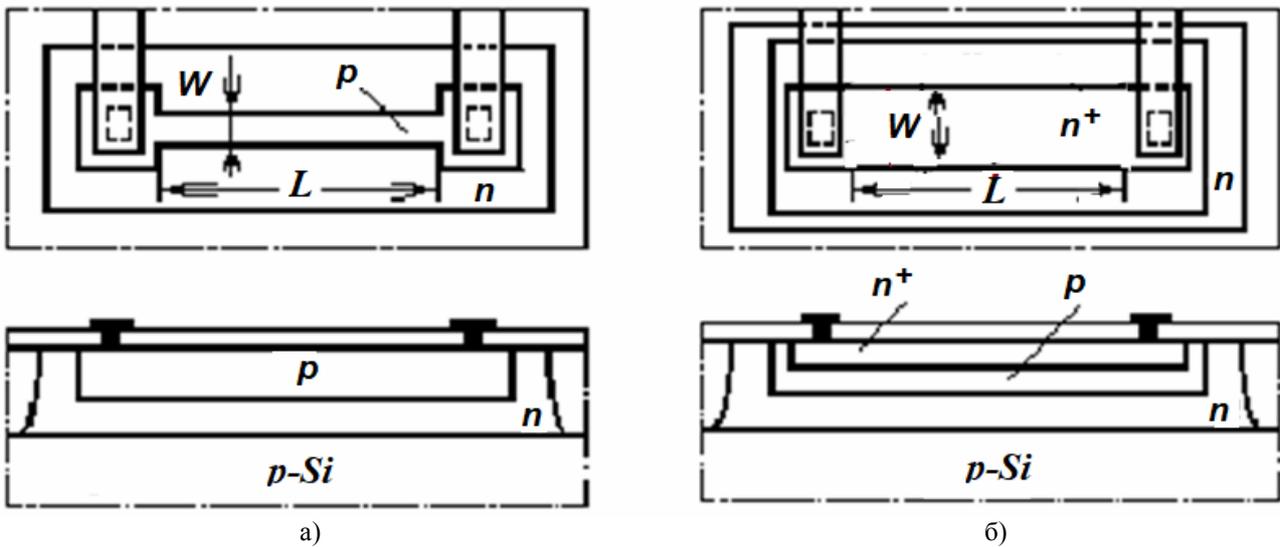


Рис.1. Конструкции интегральных резисторов: а) на базовой области; б) на эмиттерной области

валентной схеме такой транзистор моделируется двумя обратнo-смещенными диодами, каждый из которых может быть заменен барьерной емкостью.

С учетом изложенного на рис.2 приведены два варианта эквивалентных схем для ИР, выполненного на основе базовой диффузии.

Итак, для синтеза макромодели ИР необходимо выполнить два вида расчетов: паразитной емкости C , полупроводникового резистора R , который, в отличие от дискретного резистора характеризуется большим набором параметров.

Расчет параметров паразитной емкости

Характерной чертой ИР является наличие распределенной паразитной емкости. В случае диффузионного резистора, выполненного на базе p -области (базовой области $n-p-n$ -транзистора), или ионнолегированного резистора p -типа распределенная емкость представляет собой барьерную емкость обратнo-смещенного $p-n$ -перехода между p -областью базы и эпитаксиальной n -областью коллектора. Идеальной математической моделью такого резистора является RC -цепочка с большим количеством $R_i C_i$ звеньев (рис.2а). Однако для схемотехнических расчетов удобна более экономичная эквивалентная схема в виде П-образной цепочки с сосредоточенными параметрами (рис.2б), в которой суммарная паразитная емкость представлена в виде двух конденсаторов половинной емкости, подключенных к разъемам резистора.

В программе SPICE для моделирования барьерной емкости используется выражение:

$$C(V) = C_0 / (1 - V/\phi_k)^m,$$

где C_0 — величина барьерной емкости при нулевом смещении на диоде; $\phi_k = \phi_T \ln(NA \cdot ND/n_i^2)$ — контактная разность потенциалов; m — коэффициент, величина которого определяется характером распределения примеси в области $p-n$ -перехода ($m = 0,5$ для резкого перехода и $m = 0,33$ для плавного перехода); $n_i = 1,45e10 \text{ см}^{-3}$ — собственная концентрация носителей в кремнии при комнатной температуре.

В CM SPICE используются следующие обозначения этих параметров:

$$CJO \rightarrow C_0; VJ \rightarrow \phi_k; m \rightarrow m.$$

Из-за нелинейного характера барьерной емкости обычная методика моделирования ее с помощью стандартной директивы CM SPICE

`C<имя> <узел1> <узел2> <номинал>`
неприемлема.

Поэтому в макромодели ИР барьерная емкость моделируется с помощью использования модели диода, которая в CM SPICE задается двумя предложениями:

`D<имя> <узел анода> <узел катода> <имя модели> <коэф кратн>`

`.MODEL <имя модели> D (cjo= vj= m=)`

Поскольку на диод подано обратное смещение, для описания его модели необходимы только три параметра, связанные с барьерной емкостью: CJO ; VJ и m .

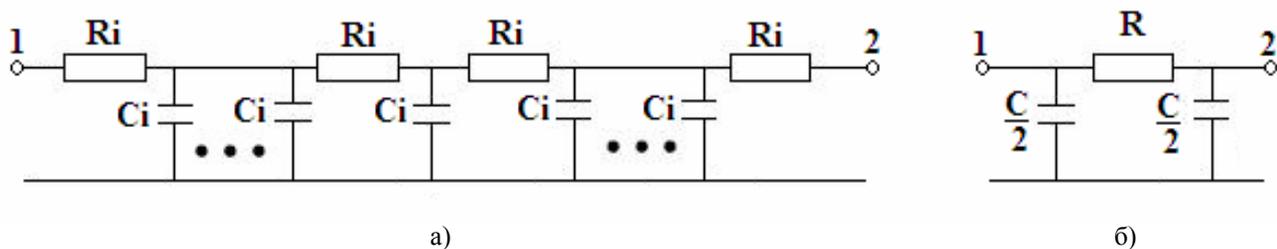


Рис.2. Математические модели ИР: а) распределенная; б) сосредоточенная

Особенности моделирования полупроводникового резистора

Для описания дискретного резистора (или упрощенного варианта ИР) в программе SPICE используется предложение типа:

```
R<имя> <узел1> <узел2> <номинал>.
```

В большинстве современных версий программы SPICE (включая PSPICE и AIM-SPICE) для моделирования полупроводникового резистора используется более сложная модель, содержащая наряду с номиналом ряд других параметров. В частности, для моделирования температурной зависимости резистора R(T) введены два температурных коэффициента TC1 (линейный) и TC2 (квадратичный). Это связано с тем, что в отличие от дискретного резистора, имеющего линейную зависимость номинала от температуры, у полупроводникового резистора эта зависимость аппроксимируется квадратичным полиномом:

$$R_{\text{имя}} = \text{номинал} * SF * (1 + TC1 * (T - T_0) + TC2 * (T - T_0)^2),$$

где SF — масштабный множитель; $T_0 = 27^\circ\text{C}$ — номинальная температура, заданная в SPICE по умолчанию; T — значение текущей температуры, которая задается с помощью директивы:

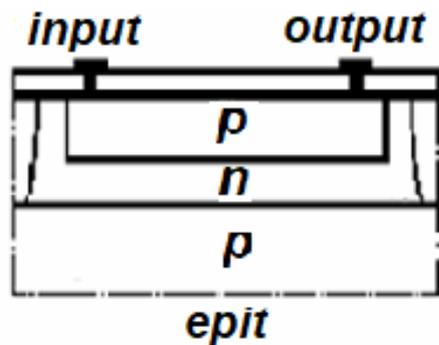
```
.TEMP T1 T2 ...
```

либо

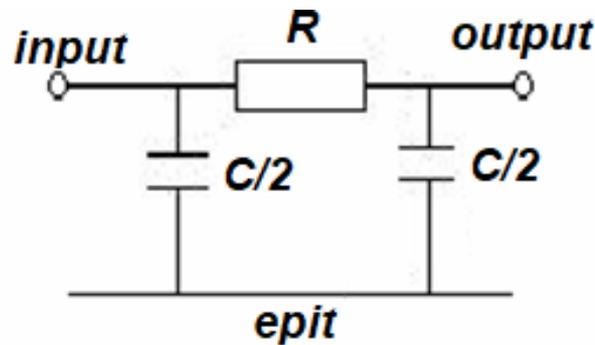
```
.DC TEMP LIST T1 T2 ...
```

В итоге для описания полупроводникового резистора используется набор двух предложений (строк):

```
R<имя> <узел1> <узел2> <имя модели> <номинал>
.MODEL <имя модели> RES (SF= TC1= TC2=)
```



а)



б)

* Макромодель диффузионного резистора на базовом слое

*

```
.SUBCKT BASE_RES INPUT OUTPUT
R_IC INPUT OUTPUT RBASE 10K
D1_C1 INPUT EPIT DIO 0.5; modeling capacitance R_IC (Спар/2)
D1_C2 OUTPUT EPIT DIO 0.5; modeling capacitance R_IC (Спар/2)
VCC EPIT 0 5V; supply voltage among collector and body
.MODEL DIO D (cjo=2pf vj=0.8 m=0.33)
.MODEL RBASE RES (SF=1 TC1=1E-3 TC2=1T-7)
.ENDS BASE_RES
```

в)

Рис.3. Топология (а), эквивалентная схема (б) и макромодель (в) ИР на базовом слое

Первая директива используется для получения семейства кривых (передаточных, АЧХ и т.д.), где температура является параметром. Поэтому все виды анализа проводятся для каждой температуры.

Синтез полной эквивалентной схемы ИР в виде макромодели

Для синтеза полной эквивалентной схемы ИР следует использовать специальную инструкцию, называемую *макромоделью* (или *подсхемой*, SUBCKT). Аналогичные инструкции имеются в языках высокого уровня (подпрограммы в языках Бейсик и Паскаль или m-файл в MATLAB). В системах моделирования SPICE макромодель используется для реализации тех же целей, а именно описания повторяющихся фрагментов схем (как в Бейсик и Паскаль) или для синтеза моделей новых приборов (аналогично m-файлам в MATLAB), отсутствующих в базовых версиях SPICE.

Описание макромодели начинается с директивы .SUBCKT и заканчивается директивой .ENDS. Между ними помещается ряд строк с описанием компонентов, входящих в состав модели.

```
.SUBCKT <имя подсхемы> <список внешних узлов>
```

(строки с описанием компонентов)

```
.ENDS <имя подсхемы>
```

Вызов подсхемы (макромодели) осуществляется в теле основной программы с помощью следующего предложения:

```
X<имя> <список узлов> <имя подсхемы>
```

Здесь X — идентификатор модели (как, например, D для диода или R для резистора).

Имена узлов и моделей, используемых в описании макромодели, являются локальными. Поэтому в основной цепи (программе) и макромодели можно

использовать совпадающие имена. Далее при обращении в основной цепи к какому-либо компоненту макромодели будут сформированы составные имена. Они образуются из имени макромодели и внутреннего имени компонента, входящего в состав макромодели. Например, конденсатор C2 макромодели X1 будет иметь составное имя X1C2.

При ссылке на компоненты макромоделей составные имена заключаются в квадратные скобки, например, V[OP1.X3.R2] означает падение напряжения на резисторе R2, входящем в состав макромодели X3, которая в свою очередь входит в состав операционного усилителя OP1.

На рис.3 приведена последовательность основных этапов формирования макромодели ИР на базовом слое, начиная от рисования топологии, синтеза эквивалентной схемы и кончая описанием макромодели на языке CM SPICE.

Формирование задания на анализ параметров ИР на языке SPICE

На рис.4а приведена схема измерения (расчета) частотных и температурных характеристик ИР. С целью реализации возможности сравнения характеристик ИР с характеристиками идеального (дискретного) резистора в измерительную схему добавлен дискретный резистор RDISKR.

Для анализа характеристик ИР воспользуемся конструкцией ИР на основе базового диффузионного слоя с параметрами, приведенными в листинге на рис.3в.

Для реализации расчета параметров ИР с помощью CM SPICE реальный источник постоянного напряжения (например, ЛИПС) и реальный генератор синусоидальных сигналов необходимо заменить их идеализированными моделями, которые вводятся с помощью предложения:

```
VCC <узел+> <узел-> DC <номинал> AC [<модуль> <фаза>]
```

В случае приведенной на рис. 4, а схемы источник постоянного напряжения имеет имя VIN и задается предложением:

```
VIN 1 0 DC 3 AC 1
```

В этом предложении источник напряжения VIN выполняет две функции:

1) в качестве источника постоянного напряжения (DC) величиной 3 В, используемого для анализа схемы по постоянному току (статического режима);

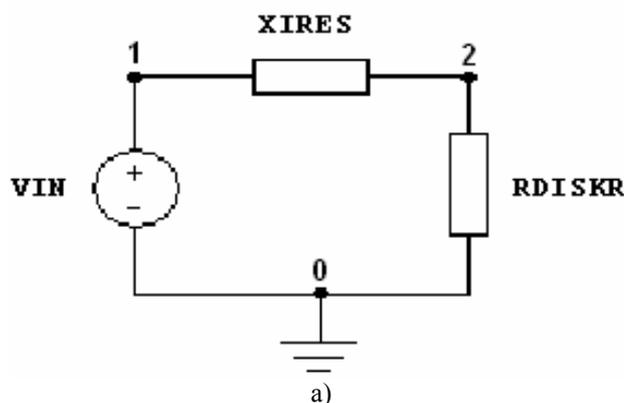
2) в качестве источника синусоидального напряжения с амплитудой 1 В и нулевой фазой ($\sin(\omega t)$) для выполнения частотного анализа (AC).

На рис.4б приведен листинг программы, используемой для моделирования частотных и температурных характеристик ИР.

Примечание. Отметим, что листинг с описанием макромодели ИР в основной программе можно не приводить. В этом случае макромодель ИР следует оформить в виде библиотечного файла, который вызывается в основную программу с помощью директивы
INC D:/AIM-SPICE/RESISTOR/RBASE.LIB

Здесь используемая в качестве паразитной емкости модель диода задается следующим образом:

```
D1_C1 input output DIO 0.5
.MODEL DIO D (cjo=2pf vj=0.8 m=0.33),
где коэффициент кратности взят равным 0,5. Это связано с тем, что весь p-n-переход разбит на две одинаковые части, моделируемые в П-образной эквивалентной схеме ИР двумя конденсаторами. Следует помнить, что CJO — полная паразитная емкость p-n-перехода при нулевом смещении.
```



```
Modeling R(T) and R(f) curves
VIN 1 0 DC 3 AC 1V; input voltage
XIRES 1 2 BASE_RES
RDISKR 2 0 10K; diskret resistor
*
* макромодель диффузионного резистора
*
.SUBCKT BASE_RES INPUT OUTPUT
R_IC INPUT OUTPUT RBASE 10K
D1_C1 INPUT EPIT DIO 0.5; modeling
capacitance R_IC (Cpap/2)
D1_C2 OUTPUT EPIT DIO 0.5; modeling
capacitance R_IC (Cpap/2)
VCC EPIT 0 5V; supply voltage among
collector and body
.MODEL DIO D (cjo=2pf vj=0.8 m=0.33)
.MODEL RBASE RES (SF=1 TC1=1E-3
TC2=1E-7)
.ENDS BASE_RES
б)
```

Рис.4. Тестовая схема (а) и ее листинг (б) для анализа характеристик ИР на языке CM AIM-SPICE

Апробация компактной модели ИР

На рис.5 и 6. приведены результаты расчета с использованием макромодели ИР его температурных и частотных характеристик соответственно.

Используя АЧХ ИР, можно определить его граничную частоту. Для данных, приведенных в листинге макромодели, ее величина равна:

$$f_{ГР} \approx 1 \cdot 10^7 \text{ Гц.}$$

Фактически использование резистора с номиналом 10К ограничивает частотный диапазон схемы на уровне 10 МГц.

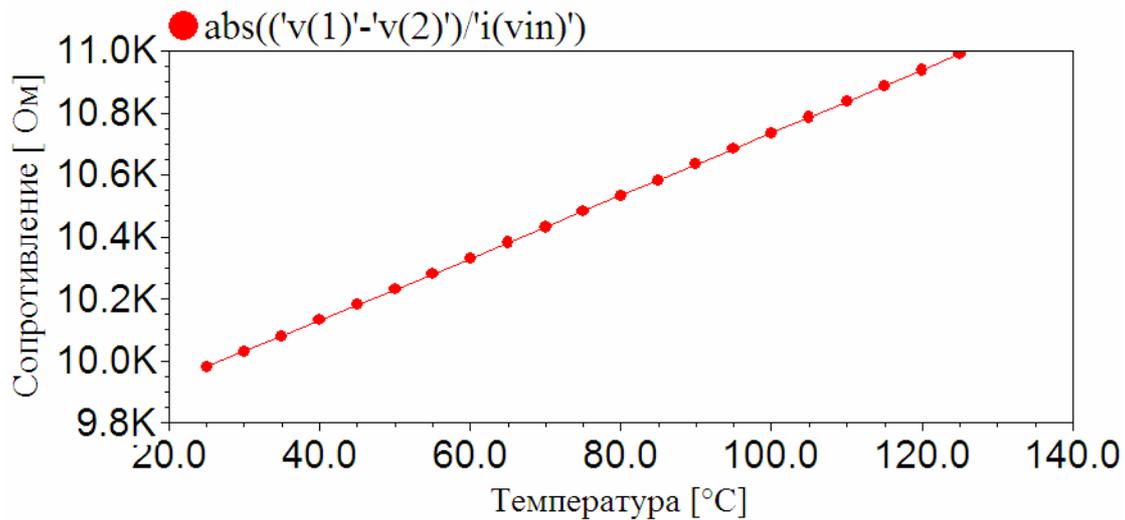


Рис.5. Температурная зависимость номинала ИР

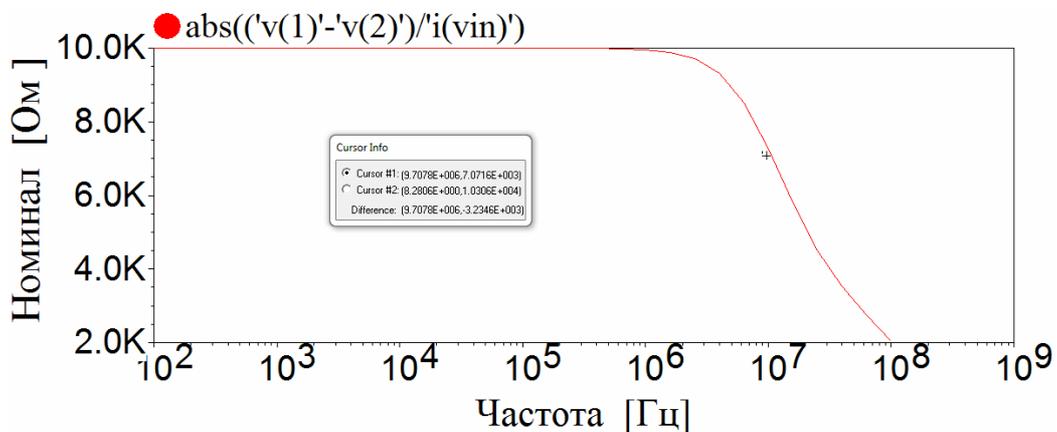


Рис.6. Амплитудно-частотная характеристика ИР

Заключение

Представленная в работе методика синтеза компактной модели интегрального резистора дает возможность распространить ее как на другие типы ИР, так и на иные типы пассивных компонентов ИС: емкости и индуктивности. Ее можно также использовать для оценки влияния шин металлизации на параметры проектируемой микросхемы.

1. Compact modeling. Principles, techniques and applications / Ed. G.Gildenblat. New York: Springer Science+Business Media B.V, 2010. 546 p.
2. Петров М.Н., Гудков Г.В. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2021. 464 с.

References

1. Compact Modeling. Principles, Techniques, and Applications. Ed. G. Gildenblat. New York: Springer Science+Business Media B.V, 2010. 546 p.
2. Petrov M.N., Gudkov G.V. Modelirovaniye komponentov i elementov integralnykh skhem: Uchebnoye posobiye [Modeling Components and Elements of Integrated Circuits: Textbook]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2021. 464 p.