

РАЗРАБОТКА SPICE МОДЕЛИ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА

М.Н.Петров

DEVELOPMENT OF SPICE MODEL OF AN INTEGRAL CAPACITOR

M.N.Petrov

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

Рассмотрена методика формирования компактной (SPICE) модели интегрального конденсатора, изготовленного с помощью биполярной технологии на основе барьерной емкости p - n перехода база — коллектор биполярного транзистора. В отличие от дискретного аналога интегральный конденсатор характеризуется большим числом параметров, что связано с наличием паразитных резистивных и емкостных компонентов. Поэтому процесс формирования макромодели интегрального конденсатора предполагает экстракцию пяти параметров: двух резисторов и трех параметров, необходимых для описания барьерной емкости. На базе синтезированной макромодели выполнен расчет ряда характеристик интегрального конденсатора, включая вольт-фарадную и частотную зависимость добротности. Предложенная методика синтеза компактной модели интегрального конденсатора может быть использована для формирования макромодели других типов интегральных конденсаторов с использованием барьерной емкости, а также МОП конденсаторов для динамической памяти и паразитных емкостей шин межсоединений интегральных схем.

Ключевые слова: подсхемы, интегральный конденсатор, макромодель, барьерная емкость, SPICE модель

Для цитирования: Петров М.Н. Разработка SPICE модели интегрального конденсатора // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.32–36. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).32-36](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).32-36)

The article discusses a technique for forming a compact (SPICE) model of an integrated capacitor manufactured using bipolar technology based on the barrier capacitance of one of the junctions of a bipolar transistor. Unlike a discrete analog, an integral capacitor is characterized by a large number of parameters, which is associated with the presence of parasitic resistive and capacitive components. On the basis of the synthesized macromodel, a number of integrated capacitor characteristics were calculated, including capacitance-voltage and frequency dependences of the quality factor. The proposed procedure for synthesizing a compact model of an integrated capacitor can be used to form macromodels of other types of integrated capacitors based on a barrier capacitance, as well as MOS capacitors for dynamic memory and parasitic capacitances of integrated circuit interconnect buses.

Keywords: subcircuits, integral capacitor, macromodel, diffusion capacity, SPICE model

For citation: Petrov M.N. Development of SPICE model of an integral capacitor // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.32–36. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).32-36](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).32-36)

Введение

Интегральные конденсаторы (ИК) представляют собой компоненты интегральных схем, состоящие из проводящих электродов (обкладок), разделенных диэлектриком, и предназначенные для использования в электрических цепях для обеспечения требуемого распределения тока и напряжения между отдельными элементами цепи.

Большинство полупроводниковых микросхем не содержит конденсаторов из-за их большой площади. Это связано с тем, что полупроводниковый или тонкопленочный конденсатор емкостью всего 50 пФ занимает приблизительно такую же площадь, как 10 биполярных или 100 МОП-транзисторов. Поэтому, если требуются емкости высокого номинала, применяют внешние дискретные конденсаторы, для подключения которых в микросхемах предусматривают специальные выводы.

В качестве конденсаторов малой емкости используются другие элементы. В полупроводниковых биполярных интегральных схемах роль конденсаторов играют обратно смещенные p - n -переходы, вы-

полненные на базе транзисторной структуры в едином технологическом процессе.

Конденсаторы на основе барьерной емкости p - n -перехода

В биполярных интегральных схемах для реализации интегрального конденсатора используется один из переходов биполярного транзистора: «эмиттер — база», «база — коллектор» или «коллектор — подложка» (рис.1). Эти переходы ранее формировались диффузией и поэтому часто называются *диффузионными конденсаторами*.

Примечание. Однако такое название может привести к неправильной интерпретации структуры этого типа конденсаторов, поскольку емкость перехода имеет две составляющие: диффузионную и барьерную.

При построении интегральных конденсаторов основную роль играет *барьерная* емкость, в отличие от которой *диффузионная* емкость шунтируется низким сопротивлением прямо смещенного диода.

Каждая из приведенных на рис.1 конструкций ИК имеет свои сферы применения. Так, ИК на базе перехода э-б (рис.1а) характеризуется максимальной удельной емкостью. Однако низкое пробивное на-

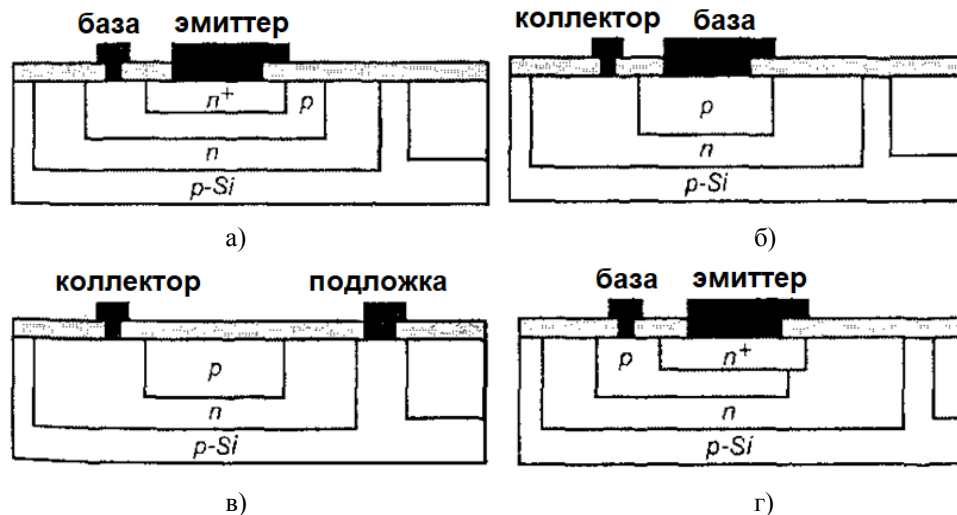


Рис.1. Конструкции интегральных конденсаторов: а — на базе перехода э-б; б — на базе перехода к-б; в — на базе перехода к-п; г — комбинированный на основе параллельно включенных емкостей эмиттерного и коллекторного переходов

пряжение этого перехода ограничивает возможность его широкого применения.

Конденсатор, сформированный на базе перехода «база — коллектор» (рис.1б) имеет более высокое пробивное напряжение (порядка 50 В). Этот переход используют при его низком обратном смещении, но одновременно высоком обратном смещении перехода «коллектор-подложка» для снижения паразитной емкости.

Конденсаторы, изготовленные на основе перехода «коллектор-подложка» имеют ограниченное применение, так как подложка обычно заземлена по переменной составляющей тока. Однако конденсатор этого типа является неотъемлемой частью биполярных интегральных схем с изоляцией $p-n$ -переходом.

Основные параметры ИК

Независимо от типа конденсаторы характеризуются следующими основными параметрами:

- номинальным значением емкости C ,
- удельной емкостью C_0 ,
- технологическим разбросом номинального значения емкости $\pm\Delta C$,
- рабочим напряжением $V_{\text{раб}}$,
- температурным коэффициентом емкости TKC ,
- добротностью Q .

Создание конденсаторов на основе $p-n$ -перехода не требует введения дополнительных технологических операций, поскольку они выполняются на переходах, предназначенных для формирования структуры интегральных транзисторов.

Компактная (SPICE) модель интегрального конденсатора

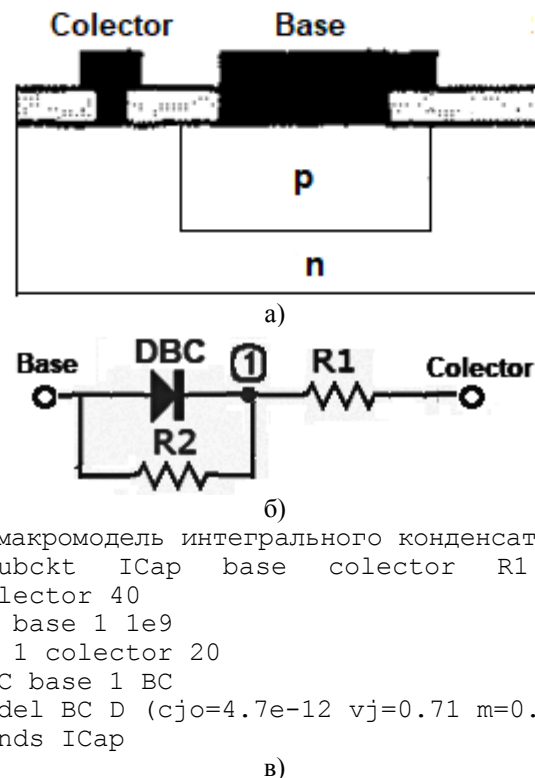
Как и в случае интегральных резисторов [1], при проектировании микросхем конденсаторы замещаются их эквивалентными схемами [2], которые представляют набор двухполюсных элементов. Такая модель получила название *компактной* (или *SPICE*). Фактически это виртуальный аналог реального конденсатора.

Здесь компактная модель также включает набор параметров, используемых для моделирования

прибора в разных режимах работы [3]: 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 конденсатора (ИК) по сравнению с эквивалентной схемой дискретного конденсатора (фактически состоящей из одного элемента — самого конденсатора) обусловлена наличием в его структуре одного или нескольких $p-n$ -переходов и нескольких паразитных сопротивлений (рис.2).



```
* макромодель интегрального конденсатора
.subckt ICap base collector R1 1
collector 40
R2 base 1 1e9
R1 1 collector 20
DBC base 1 BC
model BC D (cjo=4.7e-12 vj=0.71 m=0.5)
.ends ICap
```

Рис.2. Топология (а), эквивалентная схема (б) и макромодель (в) ИК на $p-n$ -переходе «база — коллектор»

Макромодель ИК на базе перехода «база — коллектор»

Приведенная на рис.2б эквивалентная схема ИК содержит следующие двухполюсные компоненты:

— R1 — паразитное сопротивление, используемое для моделирования сопротивления квазинейтральной области коллектора;

— R2 — паразитное сопротивление, имитирующее сопротивление утечки через p - n -переход «база — коллектор»

— DBC — диод на базе перехода «база — коллектор», используемый в качестве интегрального конденсатора.

Расчет параметров барьерной емкости

В данной работе моделирования ИК используется барьерная емкость, входящая в состав диода, выполненного на базе p - n -перехода «база — коллектор».

В программе AIM-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; 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); $\phi_k = \phi_T \ln(N_A \cdot ND/n_i^2)$ — контактная разность потенциалов; $n_i = 1,45 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ — собственная концентрация носителей в кремнии при комнатной температуре. N_A , ND — концентрация акцепторов и доноров в базовой и коллекторной областях соответственно.

В СМ 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 СМ SPICE

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

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

`D<имя> <узел анода> <узел катода> <имя модели>`
`.MODEL <имя модели> D (cjo= vj= m= )`

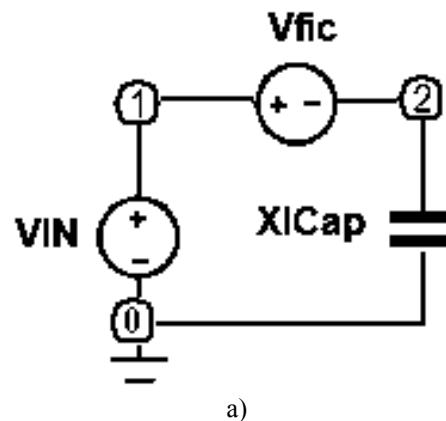
Сокращенный набор параметров компактной модели диода связан с тем, что на него подано обратное смещение. Поэтому для описания модели диода достаточно задать только три параметра, связанные с барьерной емкостью: CJO; VJ и m.

Здесь в качестве интегрального конденсатора используется модель диода, которая задается с помощью двух строк кода:

`DBC base 1 BC ; интегральный конденсатор на базе перехода б-к`
`model BC D (cjo=4.7e-12 vj=0.71 m=0.5)`

Формирование задания на анализ параметров ИК в СМ AIM-SPICE

На рис.3а приведена схема расчета (измерения) характеристик ИК, сформированного на основе перехода «база — коллектор» (рис.2а).



Modeling characteristics IC
 VIN 1 0 DC 0.5 AC 1 PULSE 0 5 0 5u;
 input voltage
 Vfic 1 2 0
 XICap 2 0 ICap; semiconductor capacitor
 * макромодель интегрально конденсатора
 .subckt ICap base collector R1 1
 collector 40
 R2 base 1 1e9
 R1 1 collector 20
 DBC base 1 BC
 model BC D (cjo=4.7e-12 vj=0.71 m=0.5)
 .ends ICap

Рис.3. Электрическая схема (а) и листинг программы (б) для расчета характеристик ИК в СМ AIM-SPICE

Для реализации расчета параметров ИК с помощью СМ AIM-SPICE реальный источник постоянного напряжения (например, ЛИПС) и генераторы импульсных и синусоидальных сигналов необходимо заменить их виртуальными моделями, которые вводятся с помощью предложения:

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

В случае приведенной на рис.3а схемы источник постоянного напряжения имеет имя VIN и задается предложением:

`VIN 1 0 DC 5 AC 1 PULSE 0 5 0 5u ;`
 input voltage

В этом предложении источник напряжения VIN выполняет три функции:

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

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

— в качестве источника импульсного сигнала для расчета в режиме анализа переходного процесса зависимости $C(V)$.

На рис.3б приведен листинг программы, используемой для моделирования частотных и передаточных характеристик ИК.

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

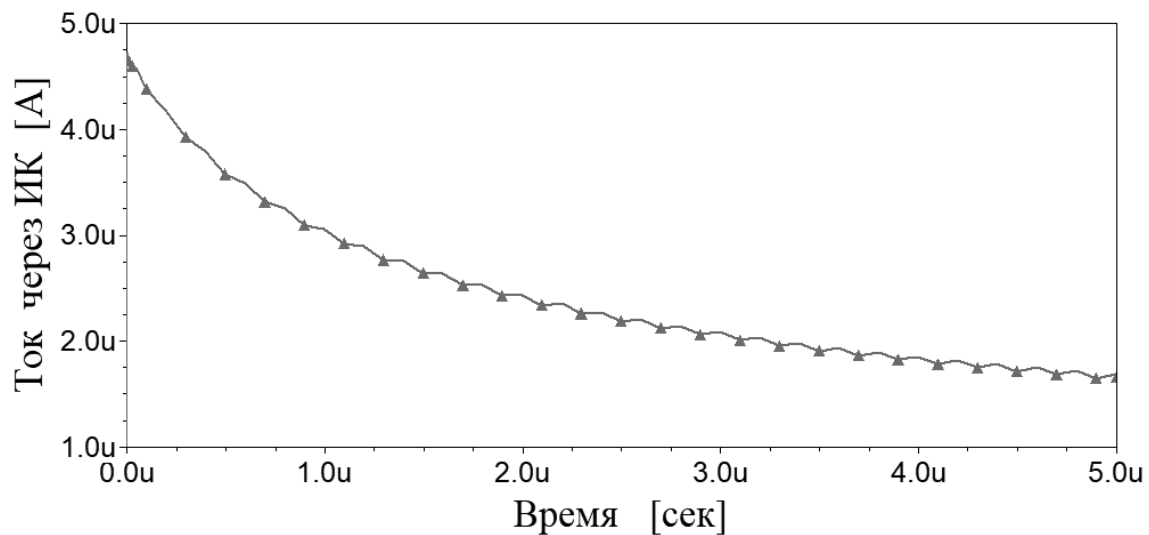


Рис.4. Ток, текущий через ИК, по результату расчета переходного процесса

Апробация компактной модели ИК

Для оценки параметров ИК выполнен расчет двух его основных характеристик: вольт-фарадной $C(V)$ и частотной зависимости добротности $Q(f)$.

Расчет вольт-фарадной характеристики

На первом этапе выполняется расчет временной зависимости тока через ИК (рис.4).

Теперь необходимо с помощью постпроцессора AIM-Postprocessor заменить название координат полученного графика:

- время => напряжение,
- ток => емкость.

Ток, текущий через емкость, определяется выражением:

$$I_d = dQ/dt = C_d \cdot dV(t)/dt.$$

Решая это уравнение относительно C_d , получим

$$C_d = I_d / dV(t)/dt.$$

где $dV(t)/dt$ — крутизна линейно нарастающего напряжения.

В данном примере в соответствии с заданным значением параметров импульсного сигнала (PULSE 0 5 0 5u)

$$dV(t)/dt = 5 \text{ В}/5 \text{ мкс} = 10^6 \text{ В/с.}$$

В итоге

$$C_d = I_d \cdot 10^{-6}.$$

Преобразуя в постпроцессоре зависимость, приведенную на рис.4, получаем кривую $C(V)$, представленную на рис.5

Частотная зависимость добротности

Важным параметром, характеризующим качество конденсатора, является добротность, которая вычисляется как отношение полного реактивного сопротивления ИК на заданной частоте к сопротивлению потерь при заданном значении емкости (или обратного напряжения для барьерной емкости):

$$Q = \text{Im}Z/\text{Re}Z = 1/2\pi fCR,$$

где f — частота, z — полное сопротивление ИК.

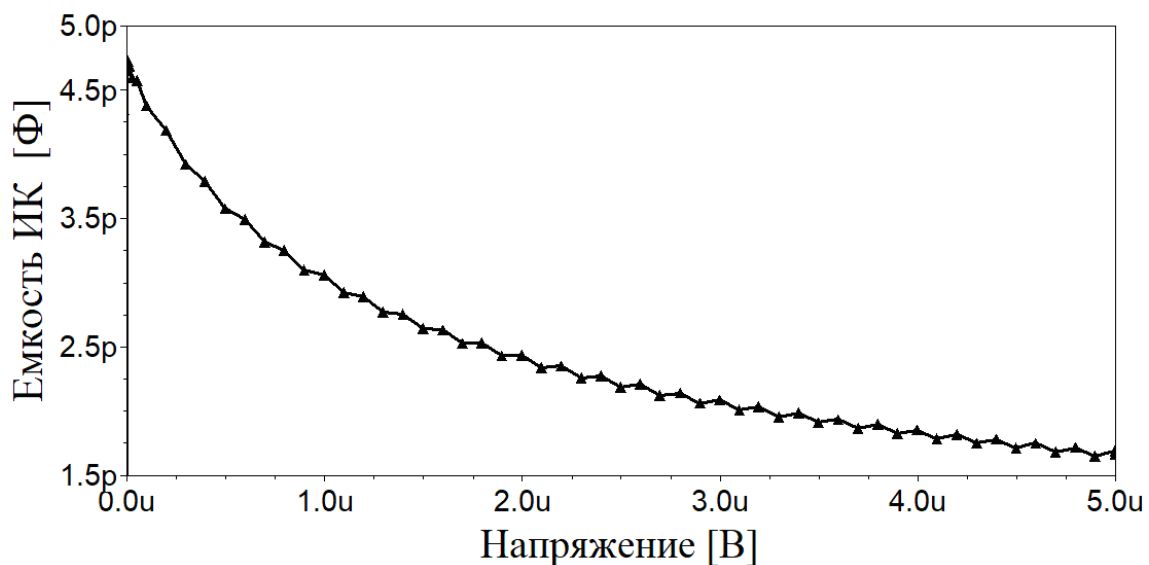


Рис.5. Вольт-фарадная характеристика ИК, рассчитанная в режиме анализа переходного процесса

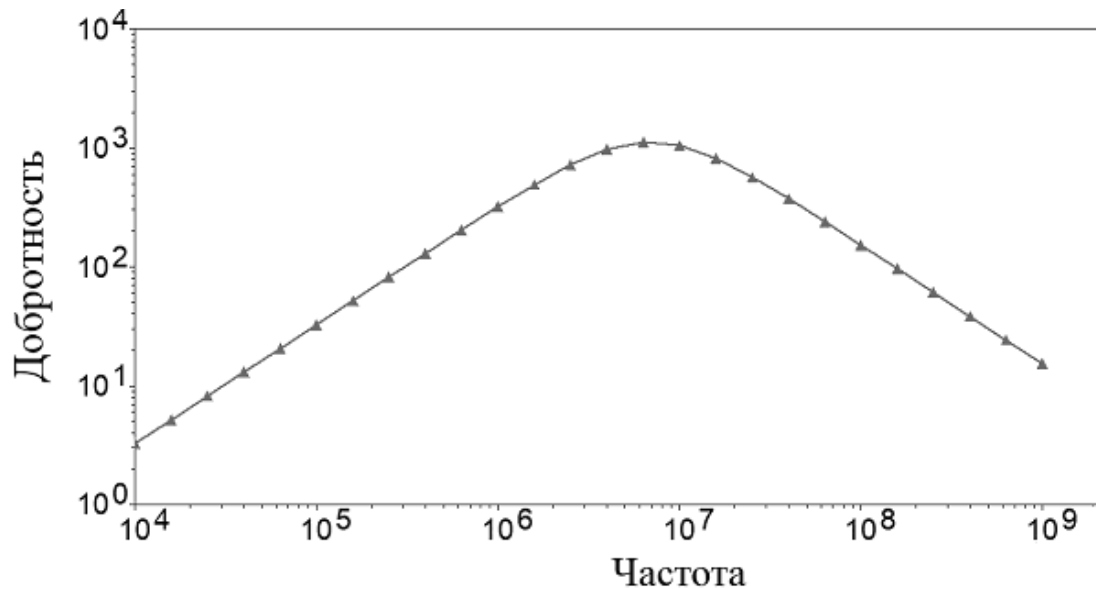


Рис.6. Частотная зависимость добротности ИК для VIN = 0,5 В

Для ИК вследствие наличия нескольких паразитных сопротивлений выражение для частотной зависимости добротности имеет более сложный вид. Для эквивалентной схемы ИК (рис.2б), содержащей два паразитных резистора R1 и R2, добротность определяется выражением:

$$Q = \frac{\text{Im} Z}{\text{Re} Z} = \frac{\omega C R_2^2}{R_1 R_2^2 \omega^2 C^2 + R_2 + R_1} \approx \frac{\omega C R_2}{R_1 R_2 \omega^2 C^2 + 1}.$$

Результаты расчета $Q(f)$ в режиме малого анализа с последующим редактированием в постпроцессоре приведены на рис.6.

Экстремальный характер полученной кривой связан с наличием в эквивалентной схеме ИК двух резисторов R1 и R2.

В области низких частот можно пренебречь последовательным сопротивлением R1, поэтому добротность ИК в этом случае можно определить как

$$Q_{\text{нч}} = \omega C \cdot R_2.$$

В области высоких частот можно пренебречь сопротивлением утечки R2. В результате добротность ИК можно определить как

$$Q_{\text{вч}} = 1/(\omega C \cdot R_1).$$

Заключение

Представленная в работе методика синтеза компактной модели интегрального конденсатора

на базе p - n -перехода «база — коллектор» дает возможность распространить ее на другие типы ИК. Ее можно также использовать для оценки влияния шин металлизации на параметры проектируемой микросхемы.

1. 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)
2. Compact modeling. Principles, techniques and applications / Ed. G.Gildenblat. New York: Springer Science+Business Media B.V, 2010. 546 p.
3. Okyere Attia J. PSPICE and MATLAB for Electronics: An integrated approach. 2nd ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. 339 p.

References

1. Petrov M.N., Telina I.S. Sintez kompaktnoy modeli integral'nogo rezistora [Development of compact model of an integral resistor]. Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2021, no. 4(125), pp. 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)
2. Compact Modeling. Principles, Techniques, and Applications. Ed. G. Gildenblat. New York, Springer Science+Business Media B.V. Publ., 2010. 546 p.
3. 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.