

УДК 621.382.32

П. А. Ушаков, доктор технических наук, профессор
 А. В. Шадрин, аспирант
 ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

РЕАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА С ФРАКТАЛЬНЫМ ИМПЕДАНСОМ НА ОСНОВЕ МОП-СТРУКТУРЫ

В статье предложен вариант реализации параметрического элемента с фрактальным импедансом (ПЭФИ), состоящего из МОП-структур, в котором дробный (фрактальный) показатель частотной зависимости импеданса может изменяться путем приложения напряжения к полупроводниковой подложке. Произведен вывод выражений Y -параметров МОП-структур как четырехполюсников, а также найдены зависимости фазочастотной характеристики (ФЧХ) ПЭФИ от приложенного напряжения, подтверждающие параметрическое изменение дробного показателя частотной зависимости импеданса. Приведен пример топологии устройства в полупроводниковой технологии.

Ключевые слова: элемент с фрактальным импедансом, резистивно-емкостный элемент с распределенными параметрами, параметрический элемент, металл-оксид-полупроводник, МОП-транзистор, МОП-структура.

Дробное исчисление, в основе которого лежат операции интегрирования и дифференцирования нецелого (дробного) порядка, в настоящее время находит широкое применение в науке и технике. Стремительному развитию теории дробных операторов способствует существование чрезвычайно широкого круга физических и технических проблем, адекватно описываемых этими понятиями. Так, в биохимии и биомедицине, в электрохимии, в современных системах управления, в обработке акустических и оптических сигналов, в электронике и связи, в электромагнетизме, в механике и мехатронике и многих других дисциплинах существуют явления, которые более точно описываются дифференциальными уравнениями дробного порядка.

Во многих практических задачах анализа динамических систем дробного порядка, когда их математическая формулировка вызывает затруднение или не требуется их аналитического решения, а необходимо оценить лишь реакцию системы на некоторое входное воздействие, широко используется аналоговое схмотехническое моделирование [1, 2].

Традиционные методы аналогового моделирования основаны на подобию дифференциальных уравнений целого порядка, описывающих некоторую физическую систему, уравнениям электрической

цепи, состоящей из обычных R -, L - и C -элементов. В отличие от них, для моделирования динамических систем дробного порядка требуются специфические элементы, уравнения состояния которых описываются дифференциальными уравнениями дробного порядка. Такие элементы в частотной области характеризуются дробной (фрактальной) степенью зависимости импеданса от частоты. Поэтому их можно назвать элементами с фрактальным импедансом (ЭФИ). Описание конструктивно-технологических вариантов ЭФИ, предложенных в литературе, их сравнительные характеристики приведены в работе [3]. В ней показано, что наиболее перспективными ЭФИ, пригодными для промышленного производства, являются ЭФИ на основе резистивно-емкостных сред. Одним из последних достижений в разработке ЭФИ на этой основе является конструкция, предложенная в [4], в которой существует возможность плавно изменять дробную степень частотной зависимости импеданса путем изменения параметров среды.

На рис. 1 показана конструкция такого параметрического ЭФИ и схема его двухполюсного включения. Элемент состоит из двух резистивных слоев 6 и 7, разделенных диэлектриком 8, и контактов 1–5.

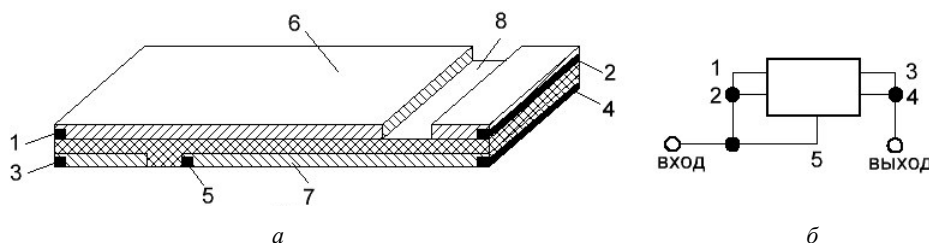


Рис. 1. Параметрический элемент с фрактальным импедансом: а – конструкция; б – схема включения

В общем случае отношение удельного сопротивления материала верхнего резистивного слоя (6) ρ_1 к удельному сопротивлению материала нижнего резистивного слоя (7) ρ_2 равно N и может изменяться под действием физического или химического воз-

действия на один из материалов слоев. Это и приводит в данной конструкции к изменению дробной степени частотной зависимости импеданса (примерно от 0,01 до 0,2 при изменении N от 0,1 до 5). Однако для использования предложенного элемента

в качестве параметрического для изменения N можно использовать лишь поля различной физической природы: электрическое, магнитное, тепловое, оптическое.

В данной работе рассмотрена возможность реализации параметрического ЭФИ (ПЭФИ) в виде МОП-структуры в составе полупроводниковой интегральной микросхемы. Такая возможность обосновывается следующими соображениями. Во-первых, МОП-структура так же, как и рассмотренная конструкция в работе [4], состоит из трех слоев. Во-вторых, принцип действия приборов на основе МОП-структур основан на изменении проводимости «канала» между «истоком» и «стоком» в области полупроводника на границе с диэлектрическим слоем под действием электрического поля. Немаловажным обстоятельством необходимости разработки такого элемента в составе интегральной микросхемы является то, что большинство современных аналоговых и цифровых интегральных микросхем выполняются именно по МОП-, КМОП-технологии. При этом одновременно с изготовлением ЭФИ в этом же кристалле будут изготовлены и активные устройства, необходимые для выполнения операций дробного интегрирования и дифференцирования.

Для проверки достижимости поставленной цели необходимо разработать и проанализировать математическую модель ПЭФИ на основе МОП-структуры. При разработке модели обратим внимание на то, что конструктивно параметрический элемент, изображенный на рис. 1, можно представить в виде совокупности трех однородных элементов со структурой слоев R - C - NR различной длины (L_1 , L_2 и L_3). Поэтому каждый из них можно представить одной и той же математической моделью МОП-транзистора, имеющей распределенное сопротивление затвора и канала, а также распределенную емкость затвор-канал.

Основываясь на принципе работы транзистора [5, 6], получим выражения для расчета погонных параметров слоев МОП-транзистора.

$$r = \frac{R_s}{W} \text{ – погонное сопротивление затвора.}$$

$$N \cdot r = \frac{1}{\mu_n \cdot C_{ox} \cdot W (V_{gs} - V_{th})} \text{ – погонное сопротивление канала.}$$

ление канала.

$$N = \frac{1}{\mu_n \cdot C_{ox} \cdot R_s (V_{gs} - V_{th})} \text{ – соотношение сопротивлений затвора и канала.}$$

тивлений затвора и канала.

$V_{th} = V_{th0} + \gamma (\sqrt{|2\phi_F + V_{sb}|} - \sqrt{2|\phi_F|})$ – пороговое напряжение.

$$c = WC_{ox} \text{ – погонная емкость затвор-канал.}$$

$$y = j \cdot \omega \cdot c \text{ – погонная проводимость затвор-канал.}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon}{t_{ox}} \text{ – удельная емкость оксида.}$$

Здесь R_s – поверхностное сопротивление материала затвора; W – ширина канала; μ_n – подвижность электронов в области канала; C_{ox} – удельная емкость оксида; V_{gs} – напряжение затвор-исток; V_{th0} – пороговое напряжение при нулевом смещении исток-подложка; γ – коэффициент, характеризующий влияние напряжения исток-подложка на пороговое напряжение; V_{sb} – напряжение исток-подложка; ϕ_F – электростатический потенциал подложки; ϵ – диэлектрическая проницаемость диоксида кремния; ϵ_0 – электрическая постоянная.

Тогда в соответствии с [7] математическую модель МОП-транзистора, работающего в линейном режиме и имеющего распределенный характер слоев, запишем как:

$$[Y] = \frac{1}{(1+N)r \cdot L} \times \begin{pmatrix} \frac{\theta}{th\theta} + N & \frac{-\theta}{sh\theta} - N & \frac{\theta}{sh\theta} - 1 & \frac{-\theta}{th\theta} + 1 \\ \frac{-\theta}{sh\theta} - N & \frac{\theta}{th\theta} + N & \frac{-\theta}{th\theta} + 1 & \frac{\theta}{sh\theta} - 1 \\ \frac{\theta}{sh\theta} - 1 & \frac{-\theta}{th\theta} + 1 & \frac{\theta}{th\theta} + \frac{1}{N} & \frac{-\theta}{sh\theta} - \frac{1}{N} \\ \frac{-\theta}{th\theta} + 1 & \frac{\theta}{sh\theta} - 1 & \frac{-\theta}{sh\theta} - \frac{1}{N} & \frac{\theta}{th\theta} + \frac{1}{N} \end{pmatrix},$$

где θ – постоянная распространения, равная

$$\theta = \sqrt{(1+N)r \cdot y} \cdot L = \sqrt{j \cdot \omega \left(R_s \cdot C_{ox} + \frac{1}{\mu_n \cdot (V_{gs} - V_{th})} \right)} L,$$

где L – длина структуры.

На рис. 2 изображена реализация ПЭФИ (рис. 1) на МОП-транзисторах. Элементы A , B и C представляют собой МОП-транзисторы со встроенным каналом, контакты 1 и 2 являются полюсами структуры, контакт 3 используется для изменения параметра N путем изменения напряжения на подложке транзисторов. Каждый из транзисторов должен работать в глубоком линейном режиме, что означает, что напряжения сток-исток должны быть очень малыми.

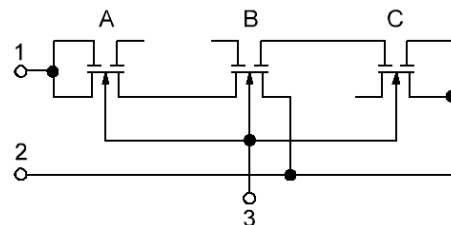


Рис. 2. Реализация ПЭФИ на МОП-транзисторах

На рис. 3 изображена топология ПЭФИ в полупроводниковой технологии, разработанная в программе Electric VLSI Design System [8]. Параметры отдельных элементов топологии приведены в таблице.

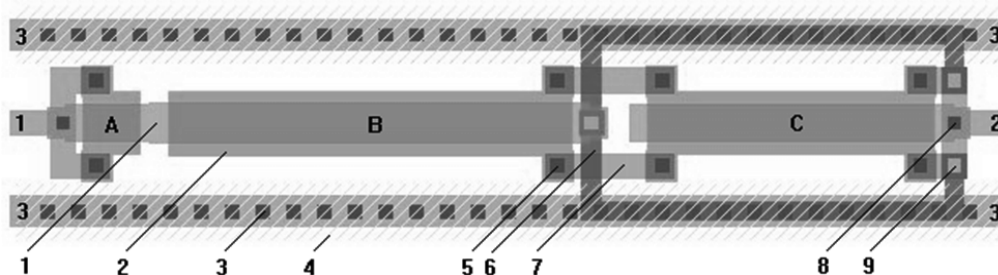


Рис. 3. Топология полупроводникового параметрического ПЭФИ: 1 – активная n -область; 2 – поликремний; 3 – контакт к подложке; 4 – p -диффузия; 5 – контакт поликремний-металл1; 6 – металл2; 7 – металл; 8 – контакт n -диффузия-металл1; 9 – переходное отверстие металл1-металл2

Для упрощения рисунка следующие слои не показаны: подложка (p -карман), активная область p -кармана, n -диффузия.

Параметры элементов топологии

Параметр	Транзистор А	Транзистор В	Транзистор С
Ширина канала, мкм	6,2	6,2	6,2
Длина канала, мкм	9,3	65,5	46,6
Сопротивление затвора, Ом	1500	10500	7500
Емкость затвор-канала, пФ	1	7	5
Номинальное N	1	1	1

Размеры структуры составляют – 162×40 мкм. Для внутренних соединений и создания портов используются два уровня металлизации (металл1, металл2). С двух сторон структура окружена контактами к подложке для обеспечения равномерного потенциала подложки по всей площади элемента.

Для разработки топологии интегральной схемы использовались следующие технологические параметры: $t_{ox} = 2$ нм, $\mu_n = 700$ см²/В·с, $V_{th} = -1$ В, $R_s = 1$ кОм.

Для моделирования частотных характеристик входного импеданса двухполюсника, схема включения которого изображена на рис. 2, найдем аналитическое выражение входной проводимости. Получим:

$$y_{11} = y_{11A} - y_{12A}^2 / [y_{22A} + y_{33B} - y_{13B}^2 / (y_{11B} + y_{11C})],$$

где y_{ijk} – параметры i -строки j -столбца матрицы соответствующего транзистора ($K = A, B, C$).

На рис. 4 изображено семейство ФЧХ входного импеданса структуры ($1/y_{11}$) с параметрами, приведенными в таблице, при изменении N . Анализ полученных ФЧХ показывает, что все они имеют участки постоянной фазы со средним значением φ_c с некоторым разбросом $\Delta\varphi_c$ в ограниченном диапазоне частот. Как известно [9], уровень постоянства фазы связан с дробным показателем α частотной зависимости импеданса выражением $\alpha = \varphi_c/90$. Следовательно, рассматриваемый элемент является ЭФИ. Поскольку среднее значение φ_c зависит от параметра N , который, в свою очередь, зависит от приложенного напряжения, то такой ЭФИ является параметрическим.

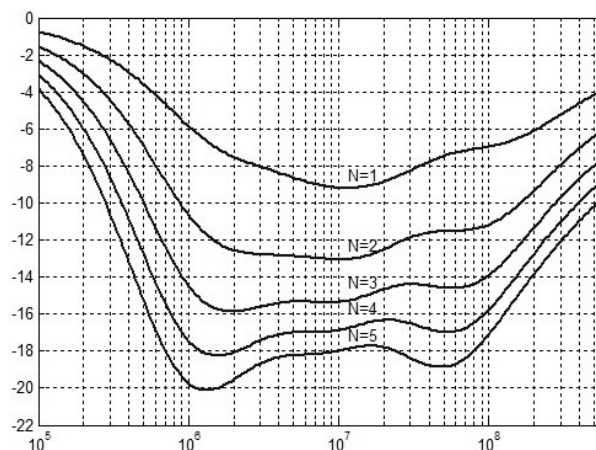


Рис. 4. Семейство ФЧХ входной проводимости для разных N

Таким образом, показана возможность реализации ПЭФИ в виде МОП-структуры в составе полупроводниковой интегральной микросхемы. Это открывает широкие возможности реализации устройств дробного интегриродифференцирования с изменяемым порядком для создания различных устройств дробного порядка: адаптивных систем, программируемых аналоговых интегральных схем, ПИД-регуляторов, фильтров с изменяемыми параметрами, решателей дифференциальных уравнений дробного порядка и т. д.

Библиографические ссылки

1. Левин Л. Методы решения технических задач с использованием аналоговых вычислительных машин / пер. с англ. И. Б. Гуревича и Г. О. Розенталя; под ред. А. Б. Саввина. – М.: Мир, 1966. – 406 с.
2. Кампе-Немм А. А. Решение инженерных задач на электронных моделирующих машинах. – Л.: Энергия, 1970. – 96 с.
3. Гильмутдинов А. Х., Ушаков П. А. Фрактальные элементы: учеб. пособие / под ред. А. Х. Гильмутдинова; предисловие чл.-кор. РАН С. А. Никитова. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2013. – 308 с.
4. Параметрический RC-элемент с распределенными параметрами: пат. 2557075 Рос. Федерация. № 2013154896/07; заявл. 10.12.2013; опубл. 20.07.2015. Бюл. № 20. – 7 с.
5. Baker Jacob R. Circuit design, layout, and simulation // Wiley-IEEE Press, ISBN 978-0-470-88132-3, 3rd Edition, 2010, p. 1208.

6. Carusone Tony Chan, Johns David. A, Kenneth W. Martin, Analog integrated circuit design // Wiley, ISBN 978-0470770108, 2nd Edition, 2011, p. 822.

7. Happ W. W., Castro P. S. Distributed Parameter Circuit Design Techniques // NEC Proc. Vol. 17, 1961. P. 44–70.

8. Static Free Software Home of the Electric VLSI Design System: Интернет ресурс. – URL: <http://www.staticfreesoft.com/> (дата обращения: 21.02.1016).

9. Гильмутдинов А. Х., Ушаков П. А. Фрактальные элементы : учеб. пособие / под ред. А. Х. Гильмутдинова ; предисловие чл.-кор. РАН С. А. Никитова. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2013. – 308 с.

* * *

Ushakov P. A., DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

Shadrin A. V., Post-graduate, Kalashnikov ISTU

Implementation of the parametric device with fractional impedance on basis of MOSFET

A MOSFET implementation of a parametric device whose impedance has a non-integer (fractional) dependency on the frequency is presented. The fractional order can be tuned by applying a voltage to the semiconductor substrate. An admittance matrix of the transistors as four-terminal devices is derived, and phase characteristics of the structure are obtained and plotted. The characteristics depend on the applied substrate voltage and it proves the ability of the fractional order to be tuned parametrically. A layout of the structure in CMOS technology is also presented.

Keywords: fractional-order device, RC-network with distributed parameters, metal-oxide-semiconductor, MOSFET.

Получено: 26.02.16