

ПЕРСПЕКТИВЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ФРАКТАЛЬНЫМ ИМПЕДАНСОМ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

© 2016 г. П.А. УШАКОВ, А.В. ШАДРИН

ФГБОУ ВО Ижевский государственный технический университет
им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск
e-mail: ushpet@izh.com, leolektor@gmail.com

Введение

В настоящее время благодаря пионерским работам Б. Мандельброта [1], В. Учайкина [2], А. Потапова [3] понятия фрактальная геометрия, фрактальные процессы, фрактальная радиолокация и радиоэлектроника и т.п. стали достаточно обыденными в научной среде, а дробное исчисление широко используется для описания процессов в электрохимии, механике жидкостей, в теории вязкоупругости, электродинамике и др.

Создание аналоговых устройств, реализующих дробные операторы (интегрирование, дифференцирование дробного порядка), которые можно было бы использовать при обработке аналоговых сигналов в пространстве дробной меры, при аналоговом моделировании объектов и процессов, характеризующихся дробной динамикой, сдерживается отсутствием соответствующей элементной базы. Эти элементы, в отличие от импеданса классических R -, L -, C -элементов, должны иметь импеданс, зависящий от частоты в дробной степени (*фрактальный импеданс*).

В работе [4] предложены конструктивно-технологические варианты таких элементов с фрактальным импедансом (ЭФИ), которые можно изготовить методами современной интегральной технологии. В частности, в работе [5] предложен вариант полупроводникового ЭФИ на основе МОП-технологии и разработана его математическая модель.

Целью данной работы является уточнение математической модели, разработанной в [5], с учетом существующих в реальной топологии МОП-структуры конструктивно-технологических ограничений. В силу того, что прототипирование полупроводникового ЭФИ требует больших материальных затрат, создание адекватной и точной модели ЭФИ позволит на стадии проектирования оценить возможность реализации ЭФИ с заданными характеристиками.

Паразитные элементы в МОП-структуре

Как известно, с увеличением частоты увеличивается и роль паразитных эффектов, возникающих в МОП-структуре, что накладывает определённые ограничения на её использование. Для того, чтобы разработанная математическая модель [5] наиболее полно отражала реальность, необходимо её дополнить с учётом паразитных эффектов.

Рассмотрим структуру n -канального МОП-транзистора, состоящую из поликремниевоего или металлического затвора, подзатворного диэлектрика (диоксид кремния) и кремниевой основы (рис. 1).

Затвор, канал и ёмкость канал-затвор представляют собой элемент с распределёнными параметрами со структурой слоёв R - C - NR . Матрица u -параметров данного четырёхполюсника представлена в [5]. Оставшиеся паразитные элементы, которые не имеют распределённый характер, а относятся лишь ко входным/выходным контактам, являются концевыми элементами и далее будут учтены в модели.

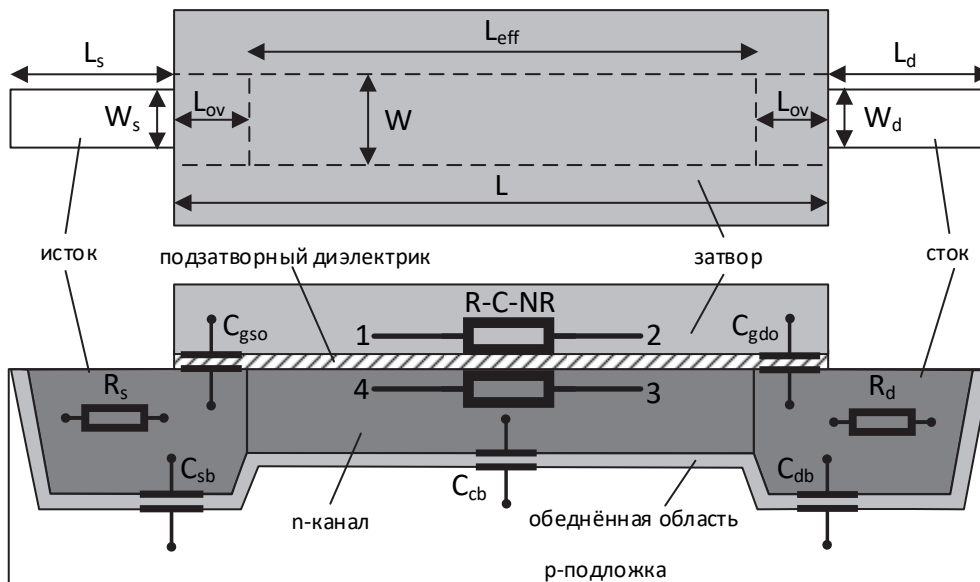


Рис. 1. МОП-структура с паразитными элементами.

Все ёмкости, имеющиеся в структуре можно разделить на 2 вида: ёмкости перекрытия и барьерные ёмкости р-п-перехода.

К первым относятся ёмкости C_{gso} и C_{gdo} , которые возникают из-за распространения диффузанта в латеральном направлении, что создаёт некоторое перекрытие L_{ov} между затвором и областями стока и истока. Величина этого перекрытия зависит только от технологии и не зависит от размеров структуры. В технологической документации может приводиться величина погонной ёмкости перекрытия затвор-сток (затвор-исток) на единицу ширины канала W , равной:

$$C_{ov} = C_{ox} \cdot L_{ov}, \quad (1)$$

где C_{ox} – удельная ёмкость подзатворного диэлектрика.

Тогда ёмкости перекрытия затвор-сток и затвор-исток равны:

$$C_{gdo} = C_{gso} = C_{ov} \cdot W. \quad (2)$$

Все р-п-переходы, смещённые в обратном направлении, имеют барьерную ёмкость из-за обеднённой области на границе перехода, которая также должна быть учтена в высокочастотной модели ЭФИ. Самую большую паразитную ёмкость данного типа создаёт р-п-переход канал-подложка – C_{cb} (channel-bulk capacitance), которая зависит от приложенного на переход напряжения и равна:

$$C_{cb} = C_{cbj} \cdot W \cdot L, \quad (3)$$

где C_{cbj} – удельная ёмкость р-п-перехода канал-подложка, равная:

$$C_{cbj} = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{V_{cb}}{\Phi_0}\right)^{mj}}, \quad (4)$$

где C_{j0} – удельная ёмкость р-п-перехода при нулевом смещении V_{cb} , Φ_0 – высота потенциального барьера р-п-перехода, V_{cb} – напряжение канал-подложка, mj – коэффициент плавности р-п-перехода.

В классической модели МОП-транзистора, работающего в линейном режиме, ёмкость затвор-канал делят пополам и относят к ёмкостям затвор-сток и затвор-исток. Поэтому ёмкость канал-подложка целесообразно так же разделить на 2 части и прибавить к ёмкостям сток-подложка C_{db} и исток-подложка C_{sb} . Эти ёмкости в отличие от ёмкости канал-подложка состоят из двух компонентов: ёмкости нижнего р-п-перехода C_{dbj} (C_{sbj}) и ёмкости бокового р-п-перехода C_{dbj-sw} (C_{sbj-sw}), которые могут быть выражены как:

$$C_{dbj} = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{V_{db}}{\Phi_0}\right)^{mj}}, \quad (5)$$

$$C_{dbj-sw} = \frac{C_{j-sw0}}{\left(1 - \frac{V_{db}}{\Phi_0}\right)^{mjsw}}, \quad (6)$$

где C_{j-sw0} – удельная боковая ёмкость р-п-перехода при нулевом смещении V_{db} , $mjsw$ – коэффициент плавности бокового р-п-перехода.

Тогда, ёмкость сток-подложка (исток-подложка) равна:

$$C_{db} = W_d \cdot L_d \cdot C_{dbj} + (2W_d + 2L_d) \cdot C_{dbj-sw} + C_{cb} / 2, \quad (7)$$

Последний элемент, который необходимо учесть это сопротивление диффузии стока (истока), которое несмотря на высокую концентрацию примеси всё же ненулевое и может иметь некоторое влияние на характеристики элемента, особенно в области высоких частот. Сопротивление диффузии зависит от поверхностного сопротивления полупроводникового материала R_{sh} , а также от размеров области стока (истока), в частности от соотношения длины и ширины, и может быть посчитано следующим образом:

$$R_d = R_{sh} \cdot \frac{L_d}{W_d}. \quad (8)$$

Оценка влияния паразитных элементов на работу ЭФИ

Для оценки влияния описанных паразитных элементов на реальный ЭФИ, рассмотрим структуру, состоящую из трёх элементов (А, В, С) со структурой R-C-NR (рис. 2). Данный элемент представляет из себя ЭФИ с возможностью параметрического изменения дробного порядка [5]. На рисунке также изображены концевые паразитные элементы, возникающие в реальной полупроводниковой структуре. Наличие или отсутствие описанных ранее паразитных ёмкостей и резисторов определяется схемой включения каждого элемента и реальной топологией структуры. Так, например, третий контакт элемента А и четвёртый контакт элемента В целесообразно выполнить в одной диффузии, тогда сопротивление и барьерная ёмкость диффузии разделится пополам на каждый из элементов.

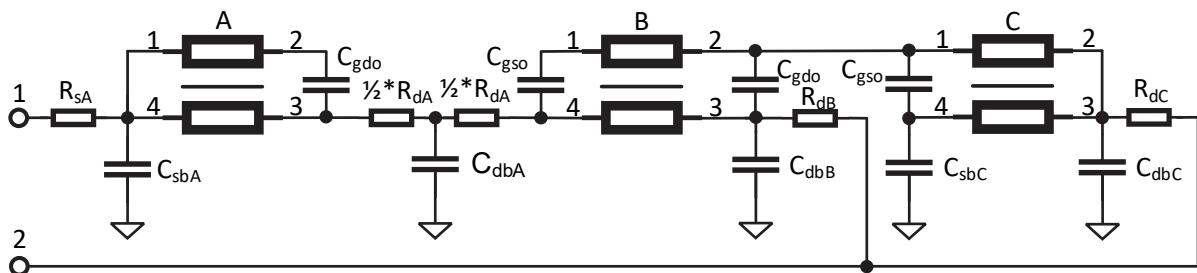


Рис. 2. Параметрический ЭФИ с концевыми паразитными элементами.

Для примерной оценки воспользуемся данными технологии Orbit 2U SCNA: $C_{ox}=0.843$ фФ/мкм², $C_{ov}=0.313$ фФ/мкм, $C_{j0}=0.0957$ фФ/мкм², $C_{j-sw0}=0.50429$ фФ/мкм, $mj=0.7817$, $mjsw=0.34651$, $\Phi_0=0.8$ В, $R_{sh}=24$ Ом/квадрат.

Тогда, при размерах структур [5]: $W_{A,B,C}=6.2$ мкм, $L_A=9.53$ мкм, $L_B=65.5$ мкм, $L_C=46.6$ мкм, длиной диффузии стока и истока $L_d=L_s=5$ мкм и примерном напряжении на р-п-переходах, равным 1В, получаем следующие номинальные величины паразитных элементов: $C_{gdA}=C_{gsA}=1.94$ фФ, $C_{cbA}=5.65$ фФ, $C_{cbB}=39$ фФ, $C_{cbC}=28,2$ фФ, $C_{sbA}=C_{dbA}=17$ фФ, $C_{dbB}=33.75$ фФ, $C_{sbC}=C_{dbC}=28.35$ фФ, $R_{sA}=R_{dA}=19.3$ Ом, $R_{dB}=2.76$ Ом, $R_{dC}=3.87$ Ом.

На рис. 3 изображена фазочастотная характеристика данного ЭФИ с учётом и без учёта концевых элементов. Видно, что паразитные элементы изменяют ФЧХ, но лишь в пределах полуградуса в диапазоне рабочих частот 10кГц – 1 МГц.

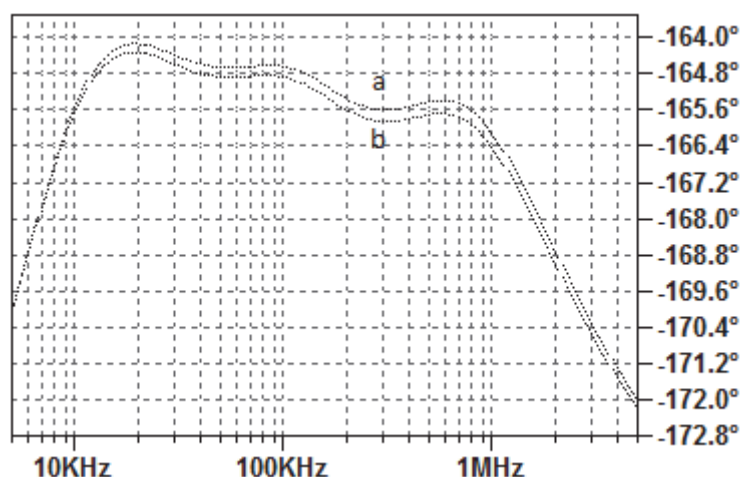


Рис. 3. Фазочастотные характеристики ЭФИ: а) идеальная; б) с учётом паразитных элементов.

Выводы

С развитием полупроводниковых технологий паразитные эффекты играют всё большую роль. Это связано с уменьшением размеров элементов, уменьшением толщины диэлектрических слоёв и расстояния между проводниками, увеличивается также боковая барьерная ёмкость р-п-перехода диффузионных областей. Латеральная диффузия также играет всё большую роль из-за уменьшения минимальной длины канала транзистора.

С другой стороны, с уменьшением толщины подзатворного диэлектрика увеличивается и распределённая ёмкость затвор-канал, что позволяет реализовывать более высокие значения постоянной времени ЭФИ, то есть частотный диапазон может смещаться в область более низких частот без необходимости увеличивать размер структуры.

В статье приведены результаты моделирования элемента с фрактальным импедансом с учётом возникающих концевых паразитных элементов и показано их влияние на фазочастотную характеристику. Из полученных результатов можно сделать вывод, что ЭФИ могут реализовываться в МОП-технологии с учётом имеющихся конструктивно-технологических ограничений. Каждая технология имеет свой набор параметров, определяющих в том числе и паразитные компоненты, и для выбора конкретной технологии для создания ЭФИ необходимо их учитывать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mandelbrot B. The fractal geometry of nature. // W. H. Freeman and Company; 1st Edition. – 1982, 462 p.
2. Учайкин В.В. Метод дробных производных // В.В. Учайкин – Ульяновск: Изд-во «Артишок», 2008. – 512 с.
3. Потапов А.А., Гильмутдинов А.Х., Ушаков П.А. Фрактальные радиоэлементы и радиосистемы: Физический аспект. Монография / под ред. А.А. Потапова. – М.: Радиотехника, 2009. – 200 с.
4. Гильмутдинов А.Х. Фрактальные элементы: учебное пособие / А.Х. Гильмутдинов, П.А. Ушаков; под ред. А.Х. Гильмутдинова; Предисловие чл.-кор. РАН С.А. Никитова. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2013. – 308 с.
5. Ушаков П.А., Шадрин А.В., Реализация параметрического элемента с фрактальным импедансом на основе МОП-структуры // Интеллектуальные системы в производстве № 1, 2016, с. 59-62.