ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 3.

УДК 621.382

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Г.М. ТРАВАДЖЯН

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ВЕЛИЧИНУ ИСКУССТВЕННОЙ ИНДУКТИВНОСТИ

Рассмотрены резонансные характеристики предложенной нами ранее схемы искусственной индуктивности. Предложена методика определения эквивалентной емкости схемы и получены экспериментальные зависимости величины эквивалентной индуктивности от параметров RC цепи обратной схемы. Показана возможность управления характеристиками индуктивного элемента путем изменения геометрических параметров, в частности, ширины затвора МОП резисторов и конденсаторов. Получено удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных характеристик.

Ключевые слова: искусственная индуктивность, схема, обратная связь, МОП конденсатор, резистор, резонанс, частота, ширина затвора, приведенная площадь.

Введение. В настоящее время в связи с бурным развитием информационной и телекоммуникационной технологий резко возрос интерес к реализованным на едином чипе радиочастотным (РЧ) интегральным схемам. Уже созданы [1] различные монолитные РЧ узлы (малошумящие усилители, управляемые напряжением генераторы, смесители, согласующие схемы и т.д.) по кремниевой МОП (металл- окиселполупроводник) технологии. В то же время для РЧ проектов, помимо активных транзисторов, желаемые характеристики схем не в меньшей степени зависят от параметров пассивных схемных компонентов. В особенности монолитные индуктивные катушки (ИК) являются наиболее критичными компонентами в современных радиочастотных проектах смешанных аналоговых сигналов.

ИК на чипе в виде спиралей различных конфигураций могут быть изготовлены по традиционной комплементарной металл-окисел-полупроводник (КМОП) технологии с незначительной модификацией проектных топологических норм. При проектировании спиральных ИК наиболее критичным фактором является оптимизация добротности на рабочей частоте. При этом определение геометрии и площади спирали ИК, требуемых для получения оптимизированных значений добротности Q на рабочей частоте, не является прямым (непосредственным) процессом. Наиболее трудным фактором процесса проектирования реальных высокодобротных ИК является минимизация влияния паразитных элементов (паразитные сопротивления и емкости) структуры. Кроме того, на высоких частотах скин-эффект становится причиной неоднородного распределения тока в металлических сегментах спирали, что приводит (помимо других факторов) к частотно-зависимому распределению паразитного сопротивления, а вызванные эффектом Фарадея электромагнитные явления индуцируют паразитные токи (вихревые токи) в кремниевой подложке, что приводит к дополнительной частотной зависимости паразитного сопротивления. Последнее может быть модулировано как методами проектирования (компромисс между площадью ИК и шириной металлических линий

спирали), так и технологическими методами (увеличение толщины металлического слоя или слоя SiO₂).

Индуцированные емкостные потери обусловлены емкостью между ИК и полупроводниковой подложкой и потерями энергии в самой подложке. Результирующее рассеивание энергии добавляет активную составляющую в мнимую часть индуктивного импеданса, и, таким образом, добротность уменьшается. Минимизировать эту емкость обычно удается удалением ИК по возможности дальше от подложки, разместив ее, например, на верхнем слое металлической многоуровневой разводки. Для снижения уровня индуцированных потерь в подложке разработано несколько методов [2,3], включающих твердотельные и заземленные экраны различных конфигураций, многоуровневую металлизацию для построения вертикальных соленоидов, а также минимизацию уровня легирования подложки под ИК. Последние достижения в технологии цифровых КМОП схем также дают значительные преимущества, в частности, добротность ИК увеличивается в четыре раза по сравнению с традиционным оксидным методом.

Таким образом, создание индуктивных элементов с высокой добротностью является одной из трудноразрешаемых проблем в микроэлектронной технологии при изготовлении полупроводниковых ИС.В этом плане поиск новых методов и способов реализации ИК с требуемыми параметрами представляет перспективную и актуальную исследовательскую задачу.

Несмотря на определенные трудности и учитывая важность проблемы, работы по улучшению параметров интегральных спиральных ИК интенсивно продолжаются. Одновременно рассматриваются и другие альтернативные возможности создания индуктивного эффекта, основанные на отличающихся физических принципах и схемотехнических решениях. В частности, полупроводниковые p-n переходы и биполярные транзисторные структуры проявляют свойства нелинейных индуктивностей [4]. Реактивная часть полного сопротивления структур рассматривается как индуктивность. Численные расчеты показывают, что значения индуктивности, добротности и активного сопротивления ИК сильно зависят от электрофизических параметров структуры и частоты сигнала.

Индуктивный эффект наблюдается и в схемах с обратной связью [5]. В работе [6] нами предложена схема и исследована возможность реализации индуктивного эффекта, основанного полностью на современной интегральной МОП технологии. Показано, что эквивалентная реактивная составляющая импеданса схемы имеет индуктивный характер и должна зависеть от сопротивления и емкости RC цепи обратной связи, также реализованной на МОП транзисторах. Отличительной особенностью предложенной схемы является возможность использования МОП транзистора в качестве типового схемного элемента. Такой вариант создания индуктивного эффекта в технологическом и схемотехническом плане совместим с современной кремниевой МОП технологией. Исследованы также характеристики саморезонанса разработанной схемы [7]. Установлена количественная связь между частотой саморезонанса схемы и шириной затвора МОП транзистора. Анализ амплитудно-частотных, фазочастотных и токовых характеристик позволяет вычислить важные параметры схемы искусственной индуктивности, в частности, эквивалентную и собственную добротность контура, оценить значения

сопротивления потерь и эквивалентное сопротивление и, что очень важно, величину искусственной индуктивности контура [8]. Показано, что для проектирования высокодобротных резонансных контуров на основе предложенной схемы необходимо выбрать оптимальное соотношение между избирательностью и требуемым уровнем выходного напряжения схемы путем регулирования геометрических и электрических параметров МОП транзисторов исходной схемы искусственной индуктивности.

Таким образом, можно утверждать, что предложенный подход применительно к микроэлектронным схемам позволит в принципе создать в едином чипе пассивные и активные компоненты с заданными электрическими параметрами.

В данной работе рассматриваются некоторые характеристики схемы искусственной индуктивности в зависимости от параметров элементов RC цепи обратной связи. Исследованы резонансные характеристики и определено влияние изменения значений параметров отдельных компонентов на характеристики схемы искусственной индуктивности.

Эксперимент. Резонансные характеристики схемы искусственной индуктивности исследованы в широком диапазоне изменения сопротивления и емкости (ширины затвора МОП конденсатора) RC цепи обратной связи. Моделирование схемы проведено для 90 *нм* МОП технологии с помощью программы HSPICE моделирования интегральных схем.

Для оценки величины собственной эквивалентной емкости схемы предложена методика, основанная на исследовании АЧХ схемы. Собственная резонансная f₀ частота контура $f_1 = 1/2\pi \sqrt{L_9 C_9}$, где L_9 и C_9 - соответственно эквивалентная индуктивность и емкость схемы искусственной индуктивности (рис.1).



Рис.1. Схема искусственной индуктивности

При подключении к входной цепи схемы внешней емкости С_в резонансная частота уменьшается и становится равной $f_1 = 1/2\pi \sqrt{L_{_9}(C_{_9} + C_{_B})}$. После простых преобразований получим выражение, позволяющее вычислить эквивалентную емкость контура при известном C_в и по измеренным значениям f₀ и f₁:

$$\frac{f_0^2}{f_1^2} = 1 + \frac{C_{\rm B}}{C_{\rm S}}.$$

При услови
и $\mathbf{C}_{_{9}}=\mathbf{C}_{_{B}}$ $f_{_{1}}=f_{_{0}}/\sqrt{2}$, следовательно, можно определить эквивалент
ную емкость резонансной схемы.

На рис.2 представлена зависимость частоты резонанса от величины внешней емкости при заданном значении ширины затвора (эквивалентно емкости) МОП конденсатора в цепи обратной связи. Зависимость получена на основе представленных на рис.З АЧХ схемы при различных значениях $C_{\rm B}$. При заданных параметрах схемы (ширины затвора МОП конденсатора, сопротивления в цепи обратной связи и т.д.), как следует из рис.2, определенная по приведенной методике эквивалентная $C_{\rm g}$ емкость составляет 80 $n\Phi$.





Рис.2. Зависимость частоты резонанса от величины внешней емкости С_в

Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика при различных значениях C_{B} (C1= 0, C6 = 500 $\pi \Phi$, шаг изменения емкости ΔC =100 $\pi \Phi$)

Аналогичным образом вычислены значения эквивалентной емкости при различных значениях ширины затвора МОП конденсатора и построена зависимость (рис.4) этой емкости от величины параметра приведенной площади S/S₀ затвора. S₀ соответствует величине максимальной площади затвора МОП конденсатора для данной серии моделирования. Таким образом, ширина затвора МОП конденсатора является эффективным геометрическим параметром, в частности, для регулирования частоты резонанса схемы через величину эквивалентной емкости.



Рис.4. Зависимость эквивалентной емкости схемы от параметра приведенной площади S/So затвора

Исследование влияния сопротивления в цепи обратной связи на характеристики схемы показало, что увеличение R в широком диапазоне приводит к уменьшению резонансной частоты схемы. Следовательно, постоянная времени RC цепи обратной связи является эффективным параметром контроля резонансных параметров схемы искусственной индуктивности. Понижение резонансной частоты обычно производится увеличением постоянной времени RC цепи, т.е увеличением ее полной емкости или сопротивления. В первом случае увеличивается площадь, занимаемая МОП конденсатором, что, следовательно, приводит к снижению плотности интеграции схемы. Во втором случае ухудшаются условия согласования схемы с нагрузкой.

Ранее [5-7] нами было показано, что схему искусственной индуктивности можно представить эквивалентным параллельным колебательным контуром, следовательно, на частоте резонанса f_p эквивалентную индуктивность Lэ схемы можно вычислить по известной формуле

$$L_{2} = 1/4\pi^{2} f_{p}^{2} C_{2}$$

По значениям эквивалентной емкости схемы (рис.4) и полученным из АЧХ экспериментальным данным частоты резонанса можно вычислить значения искусственной индуктивности в зависимости от параметров RC цепи обратной связи. На рис. 5 и 6 представлены соответствующие зависимости величины эквивалентной индуктивности от геометрических параметров, в частности, при различных сочетаниях приведенной площади S/So затвора и сопротивления R.







Рис. 6. Зависимость эквивалентной индуктивности схемы от величины сопротивления R обратной цепи при различных значениях параметра приведенной площади S/S₀ затвора

Из рис. 5 и 6 видно, что больших значений искусственной индуктивности L_э можно достичь увеличением как емкости, так и сопротивления цепи обратной связи. Однако, как показывают предварительные исследования, такого увеличения L_э можно достичь лишь за счет уменьшения приведенной добротности схемы.

Заключение. Проведенный анализ и численное моделирование показывают, что путем варьирования параметрами элементов схемы обратной связи появляется возможность управлять различными характеристиками индуктивного элемента, включающими фиксированные значения индуктивности, минимальную резонансную частоту, минимальное или максимальное значения добротности. Кроме того, становится реальной схемно-конструкторская оптимизация проекта ИК в зависимости от конкретных условий схемного применения индуктивности. Полученные определить экспериментальные зависимости позволяют также аналитические зависимости для эквивалентной индуктивности L₂ (по возможности и добротности) и тем самым построить математическую модель оптимизационной задачи проектирования ИК.

Экспериментальные зависимости хорошо соответствуют приведенным в [6] тенденциям теоретической модели искусственной индуктивности схемы, согласно которым теоретическая зависимость изменения индуктивности схемы имеет вид $L\approx 4R^2C$. На рис.7 в качестве примера показана теоретическая зависимость величины искусственной индуктивности L_3 от параметра приведенной площади.



Рис.7. Теоретическая зависимость эквивалентной индуктивности схемы от параметра приведенной площади S/So затвора при различных значениях R

Отметим, что теоретическое выражение L_э получено при условии пренебрежения потерями в индуктивном элементе. Кроме того, оно не учитывает некоторые схемотехнические особенности реализации ИК. Следовательно, сравнение данных на рис.5 и 7 показывает удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных характеристик.

Таким образом, современный уровень развития кремниевой МОП технологии и полученные в работе результаты позволяют надеяться, что в результате дальнейшего совершенствования предложенный подход может быть использован для реализации индуктивных элементов на чипе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Rogers J., Plett C. Radio frequency integrated circuit design// Artech House.- 2003.- P.410.
- Su C., Chen L., Chang S. A macro model of silicon spiral inductor // Solid- State Electronics.- 2002.-46.- P. 759-767.
- 3. Yue C.P., Wong S.S. On-Chip Spiral Inductors with Patterned Ground Shields for Si-based RF ICs // IEEE Journal of Solid-State Circuits.-1998.- V.33, N 5.- P.743- 751.
- 4. Aroutiounian V.M., Gasparyan F.V. To the theory of small-signal characteristics of p⁺ -n- n⁺ structures, based on semiconductors // Electron Technology.- 1980.-13, 3.- P. 53-59.

- 5. Aroutiounian V.M., Buniatyan V.V., Sargsyan A.V. High temperature superconducting thin film circuit parameters // Proceedings of SPIE.- 2001.- V.4490.- P.168-176.
- Buniatyan V.V., Travajyan G.M., Asatryan A.H. Artificial inductor effect on MOS transistors // Semiconductor Micro-and Nanoelectronics: Proceedings of the sixth international conference, Tsakhcadzor.- Sept. 2007.-P. 161-164.
- 7. Բունիաթյան Վ.Վ., Տրավաջյան Գ.Մ. Արհեստական ինդուկտիվության ինքնառեզոնանսի բնութագրերը // ՀՊՃՀ (Պոլիտեխնիկ) ԼՐԱԲԵՐ-75։ Գիտական և մեթոդական հոդվածների ժողովածու. Մաս 1. - Երևան, 2008. - Էջ 431- 434:
- **8.** Буниатян В.В., Траваджян Г.М. Исследование характеристик электронной схемы искусственной индуктивности // Вестник ГИУА. Сер. Моделирование, оптимизация, управление. 2007. Вып.10, т. 2. С. 35- 41.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.11.2007.

Գ.Մ. ՏՐԱՎԱՋՅԱն

ՀԵՏԱԴԱՐՁ ԿԱՊԻ ՇՂԹԱՅԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԱԶԴԵՅՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ԻՆԴՈՒԿՏԻՎՈՒԹՅԱՆ ՄԵԾՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

Դիտարկված են մեր կողմից առաջարկված արհեստական ինդուկտիվության սխեմայի ռեզոնանսային բնութագրերը։ Առաջարկված է սխեմայի համարժեք ունակության որոշման համեմատաբար պարզ մոտեցում։ Ստացվել են արհեստական ինդուկտիվության մեծության փորձնական կախվածությունները հետադարձ կապի RC սխեմայի պարամետրերից։ Յույց է տրված ինդուկտիվության տարրի բնութագրերի կառավարման հնարավորությունը ՄՕԿ ռեզիստորների և կոնդենսատորների երկրաչափական պարամետրերի, մասնավորապես փականի լայնության փոփոխման միջոցով։ Ստացվել է տեսական և փորձնական բնութագրերի բավարար համապատասխանություն։

Առանցքային բառեր. արհեստական ինդուկտիվություն, սխեմա, հետադարձ կապ, ՄՕԿ կոնդենսատոր, ռեզիստոր, ռեզոնանս, հաՃախություն, փականի լայնություն, բերված մակերես։

G.M. TRAVAJYAN

INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE FEEDBACK CIRCUIT ON ARTIFICIAL INDUCTANCE

The resonant characteristics of the artificial inductance circuit are discussed. The relatively simple approach is offered to determine the equivalent circuit capacitance. The experimental dependences of artificial inductance on feedback RC chain parameters are obtained. The possibility to control the inductive element characteristics by the variation of MOS resistor and capacitor geometrical parameters, particularly by the gate width is shown. The tolerable agreement of theoretical and experimental characteristics are obtained.

Keywords: artificial inductance, circuit, resonance, frequency, feedback, MOS resistor and capacitor, gate width, normalized area.