

К вопросу о деформационной устойчивости КМОП-элементов интегральных схем усилителей радиочастотного диапазона

Жаркой М.Ф., БГТУ «ВОЕНМЕХ»

В системах мобильной связи первым блоком радиочастотного тракта являются маломощные усилители, которые определяют шумовые характеристики всего приемного устройства. В большинстве случаев подобные усилители реализуются на МОП-транзисторе с включением по схеме с общим истоком и отрицательной индуктивной последовательной обратной связью по току [1]. В качестве нагрузочного резистора используется также МОП-транзистор. Кроме того сигнал тактовой синхронизации вырабатывается генератором гармонических колебаний, управляемым напряжением на КМОП-транзисторах [2].

Одной из проблем, возникающих при проектировании вышеуказанных систем, являются их помехоустойчивость к внешним дестабилизирующим факторам, так как такие показатели, как например, быстродействие или уровень шумов выходного сигнала, определяют качество всего разрабатываемого устройства в целом. Подобные УВЧ-тракты должны надежно работать при малых напряжениях питания и при внешних воздействующих факторах и в том числе при механических воздействиях.

Представляет определенный интерес, поэтому, оценить чувствительность отдельных интегральных МОП-элементов микросхем, работающих в аналоговом режиме, к импульсному деформационному нагружению всего полупроводникового кристалла.

В качестве воздействующих на интегральную структуру кристалла деформаций, как наиболее приемлемых с точки зрения информативности и минимизации инструментальных погрешностей, целесообразно использовать одноосные деформации сжатия, возникающие при импульсном плоско поперечном изгибе кристалла, закрепленного на балочном приспособлении ударного волноводного стенда [3]. При подобном нагружении направления действия механических напряжений σ_x или σ_y совпадают с гранями кристалла ИС.

В рамках данной задачи был проведен цикл работ по исследованию тензочувствительности отдельных КМОП-элементов бескорпусной микросхемы 764 серии. При проектировании цифровых и аналоговых устройств на МОП - и КМОП-ИС основные элементы схем - элементарные базовые элементы - состоят из двух компонентов - активного (управляющего) и пассивного (нагрузочного) [4]. В качестве объекта исследований были выбран базовый элемент, в котором в качестве активного компонента используется МОП-транзисторы с индуцированным каналом n-типа проводимости, а в качестве нагрузочного компонента также МОП - транзистор с индуцированными каналами n- типа (рис.1а). По виду вольт-амперной характеристики $I_C = f(U_C)$ нагрузочных компонентов подобная схема определяется как схема с нелинейным нагрузочным резистором.

Для простейшего вида механических воздействий на интегральные структуры - равномерно-распределенных одноосных механических напряжений σ_x направленных вдоль каналов транзисторов и с их ориентацией относительно кристаллографических осей в соответствии с рис. 2, деформационные изменения выходных напряжений на стоке ΔU_{CT} можно определить как:

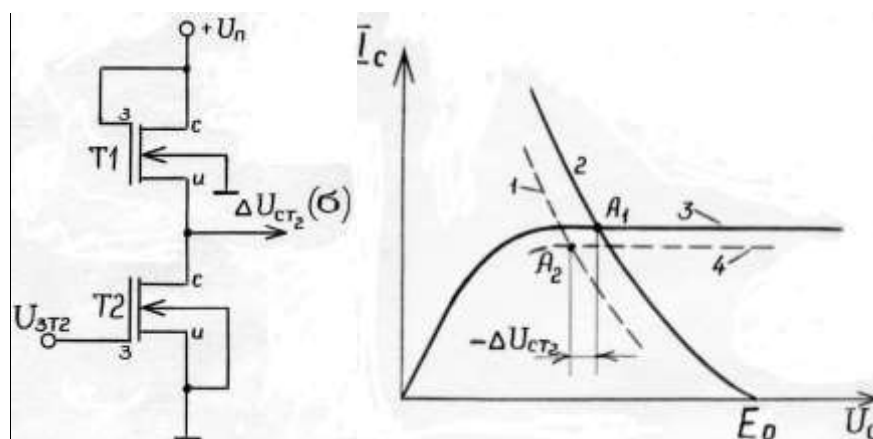
$$\Delta U_{CT2} \cong \frac{(U_3 - U_{02})k}{2(1 + \eta_1)} \left(\frac{\pi_{11}(T_2)}{4} - \frac{\pi_{44}(T_1)}{4} \right) \sigma_x, \text{ где}$$

$$k = \sqrt{\frac{\beta_2(1 + \eta_1)}{\beta_1(1 + \eta_2)}};$$

U_3 - напряжение на затворе управляемого транзистора T2; U_{02} - пороговое напряжение транзистора T2; β_1, β_2 - удельная крутизна транзисторов; η_1, η_2 - коэффициент влияния подложки транзисторов; $\pi_{11}(T_2)$ и $\pi_{44}(T_1)$ - константы пьезорезистивных коэффициентов инверсных каналов транзисторов T2 и T1, зависящие от типа проводимости канала, кристаллографической ориентации и напряженности электрического поля. При действии механических напряжений сжатия σ_x вдоль осей $[1\bar{1}0]$ и σ_y вдоль осей $[110]$ значения $\pi_{11} = -84 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, $\pi_{44} = -10 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ для n-МОП и $\pi_{11} = -10 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, $\pi_{44} = 110 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ для p-МОП-транзистора;

σ_x - действующие на интегральную структуру ИС механические напряжения.

На рис. 1.б приведены ВАХ активного (n-МОП-транзистора) и нагрузочного (n-МОП-транзисторов) элементов схемы в отсутствии (2,3) и при действии (1,4) механических напряжений σ_x , возникающих при импульсной изгибной деформации кристалла ИС.



а

б

Рис. 1. Электрическая схема (а) и вольт-амперная характеристика (б) интегрального базового элемента с нагрузочным n-МОП-транзистором.

Экспериментальные данные зависимости динамической тензочувствительности интегрального базового элемента проводились на бескорпусных микросхемах 764 ЛП1 (рис. 2) закрепленных на балочных приспособлениях ударного волноводного стенда [3].

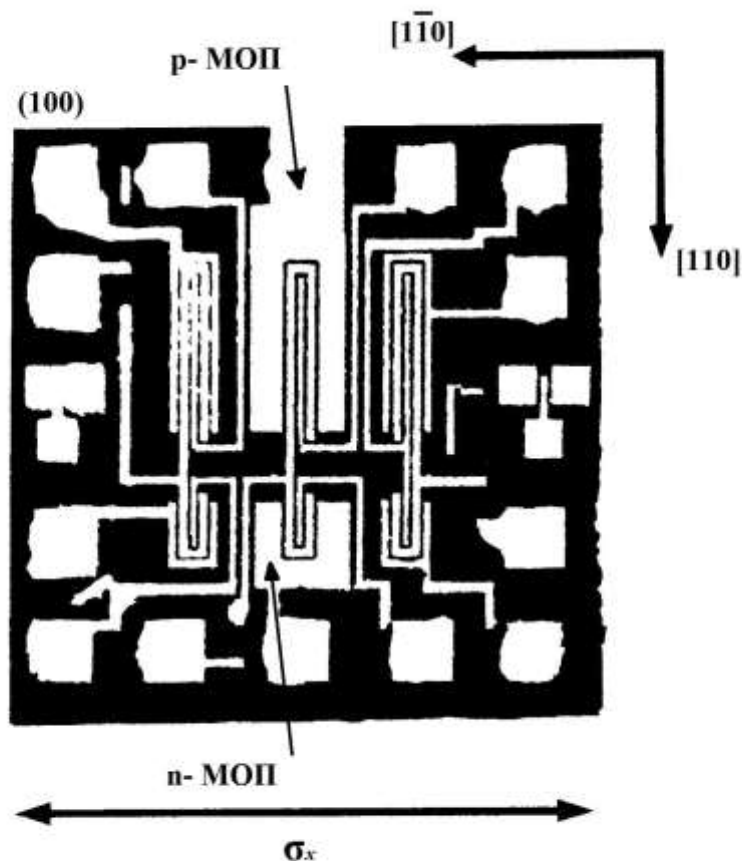
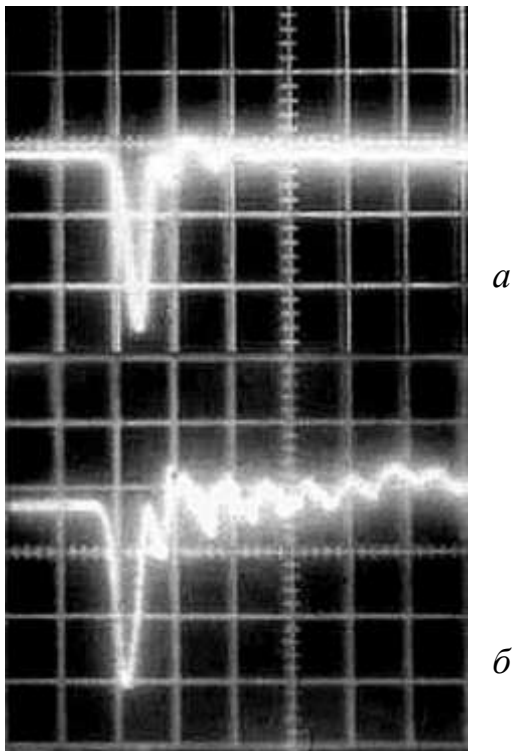


Рис. 2. Топология кристалла ИС 764 ЛП1

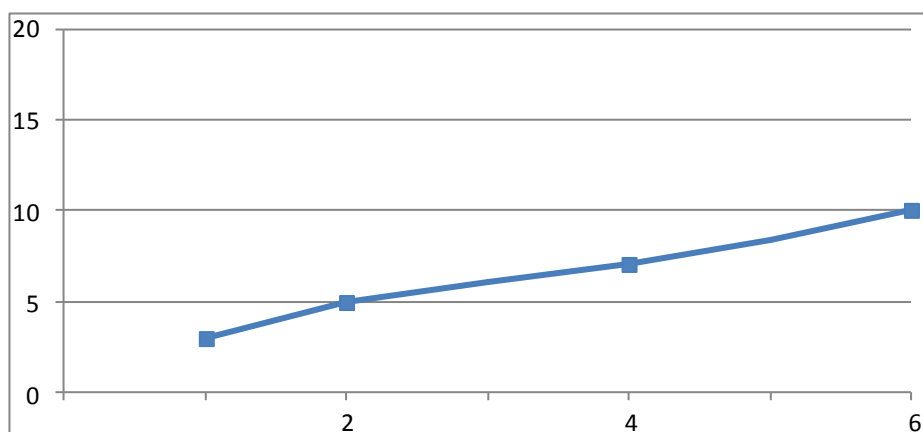
Ударный импульс амплитудой $10 \dots 50 \cdot 10^5$ м/с² действовал по нормали к балочному приспособлению, что обуславливало возникновение динамических (полу синусоидальных по форме) изгибных механических напряжений сжатия в кристалле, амплитудой в диапазоне $2 \dots 10 \cdot 10^7$ Па и длительностью порядка $40 \cdot 10^{-6}$ с (рис.3а).

Осциллограмма деформационного изменения выходного напряжения ΔU_{CT2} интегрального базового элемента с нагрузочным р-МОП-транзистором при воздействии на кристалл ИС подобной импульсной деформации балочного приспособления представлена на рис.3б. Экспериментальные зависимости $\Delta U_{CT2} = f(\sigma_{xm})$ для подобного интегрального базового элемента представлены на рис. 4.



3. Осциллограммы:
- (а) - импульсных изгибных механических напряжений сжатия на балочном приспособлении ударного волноводного стенда (тензодатчик КТД-2Б);
- (б) - деформационного изменения выходного напряжения ΔU_{CT2} интегрального базового элемента с нагрузочным n-МОП-транзистором.
(5 mV/клетка; 20 μ C/клетка).

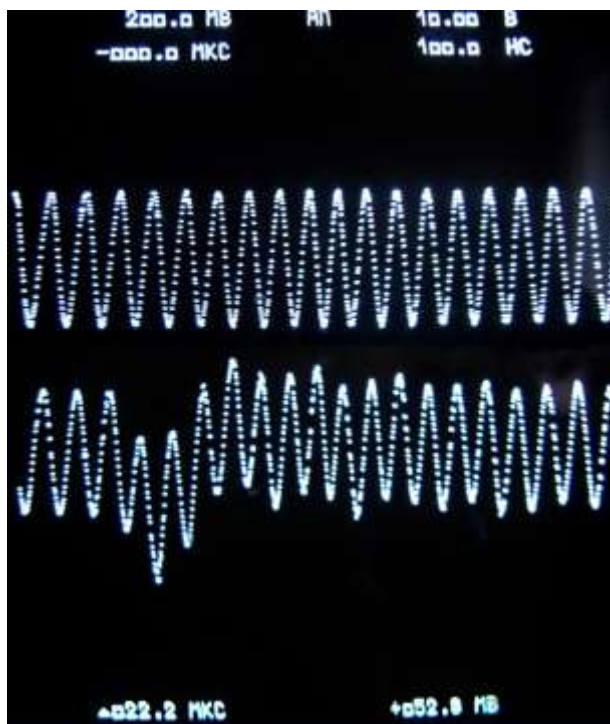
$|\Delta U_{CT2m}| \cdot 10^{-3} \text{ В}$



$|\sigma_{xm}| \cdot 10^7 \text{ Па}$

Рис. 4 Деформационная зависимость $\Delta U_{CT2} = f(\sigma_{xm})$ для интегрального базового элемента с нагрузочным p-МОП-транзистором

При использовании интегрального базового элемента на n-МОП-транзисторе с нагрузочным p-МОП-транзистором в качестве усилителя ВЧ синусоидальных колебаний, во время импульсного деформационного нагружения происходит искажение выходного синусоидального ВЧ сигнала (рис. 5).



*Рис. 5 Осциллограммы выходного сигнала усилителя:
а - при отсутствии импульсного деформационного нагружения,
б - при импульсном деформационном нагружении*

В случае равномерного распределения действующих на кристалл динамических механических напряжений, возможно, разрабатывать топологию микросхемы как с использованием приемов минимизации деформационной чувствительности отдельных n- и p-МОП-транзисторов, так и с учетом фактора взаимной ориентации каналов МОП-транзисторов в составе интегральных базовых элементов. Например, при нагрузочном p-МОП-транзисторе схемы 3.в, для компенсации смещения рабочей точки (при деформационном нагружении), целесообразен вариант взаимно-перпендикулярной ориентации каналов транзисторов T1 и T2.

При действии на кристалл КМОП-ИС сложно-распределенных полей динамических механических напряжений, задача проектирования оптимальной топологии ИС будет определяться комбинацией требований к схемотехнике, электрическим характеристикам и, в необходимых случаях, и деформационной устойчивости. Сочетание этих требований, при наличие ограничений на технологию изготовления интегральной структуры, делает сложным алгоритм решения поставленной задачи. Решение может быть

упрощенно путем разработки специальной конструкции кристаллодержателя ИС, который обеспечивал бы ослабление внешних динамических механических напряжений, действующих на кристалл, и с одновременным преобразованием подобных напряжений в напряжения одноосного изгиба.

Литература

- 1.Балашов Е., Интегральные КМОП-схемы диапазона СВЧ, Электроника, Наука, Технология, Бизнес, №7, 2016
- 2.Белов Г., Интегральные LC-генераторы, управляемые напряжением, Компоненты и технологии, №8, 2016
3. Пеллинец В.С., М., Издательство стандартов, 1975, с.288
4. Валиев К.А., Кармазинский А.Н., Королев М.А., Цифровые интегральные схемы на МДП-транзисторах. Советское радио, 1971 с.384