# SPICE моделирование КМОП ИС для экстремальных применений с помощью компактных «электро-термо-рад» моделей

### И.А. Харитонов

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики), г. Москва, ikharitonov@hse.ru

Аннотация — Описаны «электро-термо-рад» модели стойких МОП транзисторов и примеры их использования для SPICE моделирование КМОП ИС с учетом совместного влияния факторов температуры и полученной дозы излучения.

Ключевые слова — САПР, КМОП ИС, полученная доза, температура, дырочный заряд, заряд поверхностных состояний, пороговое напряжение, подвижность носителей, SPICE моделирование, электро-термо-рад модель, ячейки памяти, источник опорного напряжения, кольцевой генератор, логические вентили.

#### I. Введение

Известно, что при работе КМОП схем в экстремальных условиях совместного влияния факторов пониженной, повышенной температуры и характеристик МОП радиации деградация транзисторов обусловлена нелинейным суммированием этих факторов. При воздействии ионизирующего излучения в слоях изоляторов МОП структуры (подзатворного И разделительных) накапливается дырочный заряд, оцениваемый его плотностью  $N_{ob}$ , и формируются поверхностные состояния на границе раздела изолятор-кремний с плотностью  $N_{it}$ . Их сумма изменяет пороговое напряжение  $V_{th}$  МОП транзистора, а поверхностные состояния приводят к спаду подвижности носителей в сформированных Поскольку канале. свойства носителей излучением изоляторах заряда в существенно зависят от температуры, то и скорости отжига указанных плотностей накопления И существенно зависят от температуры, времени, мощности дозы, особенностей окислов [1, 2, 5-7 и др.].

При увеличении температуры от комнатной до 100...180°С существенно увеличиваются скорость отжига дырочного заряда и скорость генерации поверхностных состояний (см., например, рис. 1, 2) [1]. При температуре выше 200°С начинается уже отжиг поверхностных состояний [2]. В результате при различных температурах собственные изменения параметров транзисторов нелинейно суммируются с эффектами от изменения плотностей  $\Delta N_{ob} \Delta N_{it}$ , которые тоже зависят от температуры.

Как видно из приведенных на рис.1 данных для стойкой 2 мкм (Tox=32 нм) КМОП технологии фирмы при разных National Laboratory ([0]) Sandia одна и та же доза облучения при температурах различных электрических полях в изоляторе может приводить к существенно различной деградации параметров МОП транзисторов. При повышенной температуре (до +150..+200°С) и высоком напряжении на затворе деградация существенно больше, чем при комнатной из-за ускоренного формирования поверхностных состояний [1, 2]. Как результат, для схем, например, статической памяти, реализованных по данной технологии, критическое значение полученной дозы по критерию работоспособности существенно снижается при повышении температуры, (см. рис. 3 [1]).

Для субмикронных технологий также могут наблюдаться эффекты повышенного сдвига порогового напряжения и спада крутизны сток-затворной ВАХ при облучении с повышенной (до +200°С) температурой за счет тех же эффектов [9] (см. рис. 4 для технологии 130 нм).



Рис. 1. Измеренные в работе [1] сдвиги порогового напряжения в зависимости от дозы при различных значениях температуры облучения и напряжении на затворе +5B

В литературе для этих температурных зависимостей плотностей зарядов имеются физические и математические описания, однако в SPICE моделях ΜΟΠΤ для экстремальных применений они используются. Игнорирование практически не совместного влияния температурных и радиационных эффектов может приводить к существенным погрешностям расчетов характеристик МОП схем в условиях совместного влияния температуры и радиации [1], когда деградация при повышенной температуре оказывается существенно больше. В работе [3] автором данной работы были предложены новые «электро-термо-рад» SPICE молели. позволяющие учесть совместное влияние факторов температуры и радиации на электрические характеристики МОПТ.

В данной работе приведены результаты применения данных моделей для схемотехнического моделирования работы фрагментов КМОП ИС с различными проектными нормами в условиях совместного влияния указанных факторов.



Рис. 2. Измеренные в работе [1] сдвиги порогового напряжения и его составляющих п-канального транзистора для дозы 500 крад, мощности дозы 0.27 рад/сек в зависимости от температуры облучения (анапряжение на затворе +5В, б - напряжение на затворе 0В,)



Рис. 3. Измеренные в работе [1]значения дозы, вызывающей сбой микросхемы 16К статической памяти SA3240 в зависимости от температуры облучения



Рис. 4. Измеренные в работе [9] значения пороговых напряжений п-канального (а) и р-канального (б) МОПТ (130 нм технология) в зависимости от полученной дозы при различных температурах облучения. Мощность дозы 170 рад/сек

#### II. «Электро-термо-рад» SPICE модели для МОП транзисторов

Используется расширенный вариант нашей SPICE модели МОПТ [4], в которой применяются зависимости параметров модели от наведенных обучением плотностей дырочного заряда  $\Delta N_{ot}$  и поверхностных состояний  $\Delta N_{it}$  в подзатворном и изолирующих оксидах МОПТ. Для учета совместного влияния температуры и полученной лозы использованы зависимости этих  $\Delta N_{at}$  и  $\Delta N_{it}$  от времени облучения, мощности дозы, температуры и других факторов из работ [5-8 и др.]. Пороговое напряжение МОПТ с учетом факторов температуры и дозы описывается традиционным выражением:

$$VTH0(D,T) = VTH0(0,T) - \frac{\Delta N_{ot}(D,T)q}{C_{ox}} \pm \frac{\Delta N_{it}(D,T)q}{C_{ox}}$$
(1)

$$\Delta V_{ot}(\mathbf{D},T) = \frac{\Delta Q_{ot}(D,T)}{C_{m}} = \frac{\Delta N_{ot}(D,T)q}{C_{m}}$$
(2)

$$\Delta V_{ii}(D,T) = \frac{\Delta Q_{ii}(D,T)}{C_{ox}} = \frac{\Delta N_{ii}(D,T)q}{C_{ox}} \quad , \tag{3}$$

где VTH0(0,T) – температурно-зависимый модельный параметр порогового напряжения МОПТ без учета облучения (используются стандартные температурные зависимости применяемой схемотехнической модели МОП), С<sub>ох</sub> –емкость подзатворного окисла.

В отличие от распространенных вариантов использования выражений (2) и (3) в схемотехнических моделях МОПТ в данном случае в них дополнительно учитываются комплексные зависимости плотностей  $\Delta N_{ot}$ ,  $\Delta N_{it}$  от температуры, дозы, электрического поля и других факторов.

Зависимость модельного параметра U0 подвижности от температуры T и полученной дозы D описывается широко используемым выражением с учетом плотности поверхностных состояний  $\Delta N_{it}$ , в котором дополнительно учтена их зависимость от температуры и дозы:

$$U0(D,T) = \frac{U0(0,T)}{1 + \alpha_1 \cdot \Delta N_{ii}(D,T)}$$

$$\tag{4}$$

где  $\alpha_1$  – подгоночный параметр.

Зависимость предпорогового наклона стокзатворной ВАХ МОПТ от температуры и дозы описывается стандартным выражением моделей BSIM3, BSIM3SOI и др. через параметр модели  $C_{it}$ , зависящий от  $\Delta N_{it}$ :

$$C_{it}(D,T) = k_{it} \cdot q \cdot \Delta N_{it}(D,T)$$
<sup>(5)</sup>

где  $k_{it}$  – подгоночный коэффициент.

Для плотностей  $\Delta N_{ot}(D,T)$ ,  $\Delta N_{it\_gener}(D,T)$ (сгенерированная составляющая) использованы модифицированные известные [5, 6, 7 и др.] выражения с учетом мощности дозы *R*, температуры *T*, времени облучения *t* и др. факторов:

$$\Delta N_{ot}(E,t) = N_{ot\_satur}(E) \cdot \left(1 - e^{-k_{ot} \cdot R \cdot t}\right) \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{t}{t_{s\_ot}(E)}\right)}{A_{ot}}\right] \quad (6)$$

$$\Delta N_{it\_gener}(E,t) = N_{it\_satur}(E) \cdot \left(1 - e^{-k_{it} \cdot R \cdot t}\right) \times \left[1 - \left(1 + \frac{t}{t_{s\_it\_gener}(E)}\right)^{-\nu}\right] \quad (7)$$

Результирующая плотность поверхностных состояний с учетом их температурно-активированного отжига:

$$\Delta N_{ii}(E,t,T) = \Delta N_{ii\_gener}(E,t,T) \cdot \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{t - t_{delay\_anneal}}{t_{s\_it\_anneal}(E,T)}\right)}{A_{ii}} \right]$$
(8)

где  $N_{ot_satur}(E)$ ,  $N_{it_satur}(E)$  – соответствующие значения концентраций при  $t \rightarrow \infty$ ,

 $t_{s_of}(E,T)$ ,  $t_{s_ii_gener}(E,T)$ ,  $t_{s_ii_gener}(E,T)$  – постоянные времени отжига дырочного заряда, генерации и отжига поверхностных состояний, соответственно.

 $k_{ot}$ ,  $k_{ib}$ , v,  $A_{ob}$ ,  $A_{it}$  – подгоночные коэффициенты.

Для зависимости приведенных выше постоянных времени от температуры *T* использованы стандартные выражения вида [6, 8 и др.]:

$$t_s(E) = K_t \cdot \tau_{1/2} (E)$$
 (9)

где измеряемое время  $\tau_{1/2}$  половинного отжига (генерации) соответствующей плотности зарядов описывается известным [6, 8 и др.] выражением:

$$\tau_{1/2}(E,T) = \tau_{1/2 \ 0} \cdot e^{(E_{act} - k_e \cdot E)/kT} \quad (10)$$

 $\tau_{1/2}$  – подгоночный параметр,

 $E_{act}$  — энергия активации соответствующего процесса накопления или отжига (0.5...1 эВ),

Е- электрическое поле в изоляторе.

Постоянные времени в вышеприведенных выражениях имеют различные значения времен половинного завершения процесса и энергии активации  $E_{act}$ , определяемые в процессе подгонки результатов моделирования характеристик МОПТ к результатам измерений для различных условий облучения.

За счет совместного использования встроенных температурных зависимостей параметров модели МОПТ и дополнительно введенных радиационных зависимостей параметров модели от плотностей зарядов и зависимостей самих плотностей от температуры и эквивалентной полученной дозы, «электро-термо-рад» модель МОПТ позволяет учесть совместное нелинейное влияние факторов температуры и полученной дозы облучения на характеристики МОПТ для экстремальных условий эксплуатации.

#### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КМОП СХЕМ С УЧЕТОМ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОЛУЧЕННОЙ ДОЗЫ

В качестве первой иллюстрации применения модели использована упомянутая выше достаточно старая стойкая КМОП технология (длина канала 2 мкм, толщина подзатворного окисла 32 нм) фирмы Sandia National Laboratory, так как, во-первых, на ней эффекты радиационного воздействия проявляется заметно, и, во-вторых, она была подробно исследована и описана в опубликованных работах [1, 10, 11 и др.]. В соответствии с данными упомянутых работ для этой технологии были определены параметры «электротермо-рад» моделей МОПТ. В частности, для 27°С и напряжения на затворе 6 В во время облучения параметры, описывающие временные зависимости для плотности дырочного заряда равны:

 $t_{s_{ot}} = 2.1 \cdot 10^4$  сек,  $\tau_{I/2_{ot}} = 2 \cdot 10^5$  сек, ke = 0.03.

 $E_{act\_ot} = 0.8 \ \Im B.$ 

Для плотности поверхностных состояний:

$$t_{s\_it\_gener} = 1.2 \cdot 10^5$$
 сек,  $\tau_{1/2\_it\_gener} = 4 \cdot 10^5$  сек,  $ke = 0.02$ ,  
 $E_{act\_ot} = 0.85$  эВ.

Смоделированные сдвиги порогового напряжения и его составляющих для n-канального транзистора, лозы 500 крад, мощности дозы 0.27 рад/сек, напряжения на затворе +5В в зависимости от полученной дозы приведены на рис. 4 для температуры 27°С (а) и 125°С (б). Такие зависимости порогового напряжения от дозы объясняются тем, что при повышенной температуре в соответствии с постоянные времени отжига выражением (10) дырочного заряда и генерации поверхностных состояний уменьшаются в несколько раз и при низкой мощности дозы и большом времени облучения дырочного заряда сильнее плотность спадает, а поверхностных состояний плотность сильнее увеличивается (по сравнению комнатной с температурой) и в соответствии с выражением (1) пороговое напряжение Vt увеличивается. Кроме изменения порогового напряжения повышенный рост поверхностных состояний при высокой температуре сильнее снижает подвижность носителей в канале МОПТ (в соответствии с выражением (4)), что суммируется с ее спадом при повышенной температуре и приводит к резкому ухудшению динамических характеристик КМОП схем.

Данные приведены для n-канальных транзисторов, так как у них дырочные заряды и поверхностные состояния смещают пороговое напряжение в разные стороны и поэтому эти транзисторы более чувствительны к точности описания составляющих сдвига порогового напряжения.





В качестве основы параметров SPICE модели использованы данные [12] для соответствующей технологии и имеющиеся у авторов данные. С этими параметрами были промоделированы характеристики ячеек статической памяти упомянутой выше SA3240 фирмы Sandia National Laboratory (в ней используются сопротивления в цепи затворов транзисторов для повышения устойчивости к одиночным сбоям) с учетом совместного влияния температуры полученной дозы в соответствии с данными рис. 1-3. Рассчитанные значения дозы, при которой происходит потеря работоспособности ячеек памяти, в зависимости от температуры облучения приведены на рис. 5 вместе с исходными данными [1]. Видно, что результаты моделирования с использованием разработанных моделей правильно отражают влияние параметров транзисторов на работу схемы.



Рис. 5. Измеренные в работе [1] (пунктир) и смоделированные с использованием "электро-терморад" моделей (крестики) значения дозы, вызывающей сбой работы ячеек микросхемы 16К статической памяти SA3240 в зависимости от температуры облучения

В качестве второй иллюстрации применения «электро-термо-рад» модели использована упомянутая выше технология с проектными нормами 130 нм [9] (см. рис. 4). Для этой технологии по данным работы [9] для п-канального МОПТ (L=280 нм) получены параметры, описывающие временные зависимости для плотности дырочного заряда:

$$t_{s,ot} = 3 \cdot 10^4 \text{ сек}, \tau_{1/2,ot} = 1 \cdot 10^5 \text{ сек}, ke = 0.02.$$

 $E_{act ot} = 0.75 \text{ } \text{ } \text{B}.$ 

Для плотности поверхностных состояний:

 $t_{s\_it\_gener} = 6.7 \cdot 10^3$  cek,  $\tau_{1/2\_it\_gener} = 8 \cdot 10^5$  cek, ke = 0.03,  $E_{act ot} = 0.8$  3B.

Смоделированные зависимости сдвига порогового напряжения и его составляющих для n-канального транзистора, мощности дозы 160 рад/сек, напряжения на затворе +1В в зависимости от полученной дозы для температуры 27°С (а) и 200°С (б) приведены на рис. 5.

Характер изменения порогового напряжения с дозой при повышенной температуре аналогичен данным для технологии 2 мкм, рис. 5. Меньшие сдвиги порогового напряжения для рис. 6 по сравнению с рис. 5 объясняются существенно меньшей толщиной подзатворного окисла (5 нм для рис. 5) по сравнению с технологией 2 мкм (32 нм) и, соответственно, меньшей генерацией зарядов в окисле при облучении.

Для технологии 180 нм, используя определенные параметры «электро-термо-рад» модели на основе BSIM3, была промоделирована схема источника опорного напряжения из [9], представленная на рис. 7.. Сравнение результатов измерений (а) авторами [9] и моделирования (б) с использованием разработанных моделей зависимости выходного напряжения схемы опорного напряжения от полученной дозы при температурах 25, 100 и 200°С приведено на рис. 8. Следует отметить, что схема работает в предпороговом режиме и имеет сильную зависимость выходного напряжения от соотношений пороговых напряжений, крутизн и предпорогового наклона ВАХ п- и рканальных транзисторов. Видно, что результаты расчета по разработанным моделям и данные [9] качественно близки. Такой ход кривых зависимости выходного опорного напряжения от дозы объяснен авторами [9] и подтвержден нашими расчетами. Выходное напряжение схемы определяется как разница напряжений затвор-исток n- и р-канальных выходных транзисторов (Мп и Мр на рис. 7).



(б)

Рис. 6. Смоделированные зависимости сдвига порогового напряжения и его составляющих для пканального транзистора (L=280 нм), при мощности дозы 160 рад/сек, напряжения на затворе +1В в зависимости от полученной дозы для температуры облучения 25°С (а) и 200°С (б). Использованы данные [9]

При комнатной температуре пороговое напряжение n-канального транзистора слабо уменьшается, для рканального – слабо увеличивается (по модулю). В результате выходное напряжение немного возрастает.

При <u>повышенной до +100°C</u> температуре до дозы примерно 400крад пороговое напряжение п-канального МОПТ уменьшается, р-канального увеличивается, выходное напряжение растет. Выше 400 крад пороговое напряжение р-канального МОПТ продолжает увеличиваться (по модулю), в то время как для п-канального оно остается неизменным из-за усиленного роста поверхностных состояний на границе «подзатворный окисел - полупроводник» и компенсации им дырочного заряда. Дополнительно добавляется влияние спада подвижности п– и р-МОПТ из-за роста поверхностных состояний. В результате выходное напряжение начинает спадать.



Рис. 7. Схема источника опорного напряжения, спроектированная и изготовленная по технологии КМОП КНИ 130 нм в работе [9]



(Ծ)

Рис. 8 Сравнение результатов измерений [9] (а) и SPICE моделирования с помощью разработанных «электротермо-рад» моделей (б) зависимостей выходного напряжения (V<sub>REF</sub>) схемы рис. 7 от полученной дозы. Данные приведены для трех температур: 25, 100, 200°С

При высокой  $(+200^{\circ}C)$ температуре из-за порогового начального спада напряжения Nканального МОПТ выходное напряжение спалает. Затем пороговое напряжение п-канального МОПТ начинает расти из-за активного роста поверхностных у р-канального МОПТ состояний: пороговое напряжение монотонно растет (по модулю) с дозой. Рост поверхностных состояний вызывает значительный спад подвижности для n- и p-МОПТ, что уменьшает их крутизны. В результате суммирования приведенных факторов выходное напряжение меняется слабо.

При проектировании источника опорного напряжения [9] авторы предприняли специальные меры по обеспечению стабильности выходного напряжения при изменении температуры и дозы облучения, поэтому в ней абсолютные изменения выходного напряжения весьма малы. Для анализа влияния нелинейного взаимодействия радиационных и тепловых эффектов в МОП транзисторах на работу цифровых схем для данной технологии 180 нм (используя определенные параметры «электро-терморад» модели на основе BSIM3) дополнительно были промоделированы цифровые КМОП схемы: кольцевой генератор на 11 инверторах и ряд логических вентилей. Известно, что кольцевые генераторы весьма чувствительны к параметрам транзисторов и широко используются для анализа влияния параметров транзисторов на работу цифровых схем. Результаты моделирования приведены в табл. 1. Из приведенных результатов видно, что совместное воздействие повышенной температуры и дозы облучения приводит к существенно большему (около 2-х раз) ухудшению динамических параметров схем по сравнению с воздействие только температуры или радиации.

#### Таблица 1

Смоделированные с использованием «электро-термо-
рад» моделей динамические параметры кольцевого
генератора (11 инверторов) и схемы 2И-НЕ
(технология 130 нм, L=280 нм)

Условия	Частота	Время	Время
облучения	кольцевого	нарастания	спада t <sub>fall</sub> , нс
	генератора,	t <sub>rise</sub> , нс схемы	схемы 2И-
	ГГц	2И-НЕ	HE
27°C	0.9	0.03	0.06
27°С и	0.8	0.04	0.07
1 Мрад			
200°C	0.45	0.07	0.08
200°С и			
1 Мрад	0.22	0.13	0.09
_			

#### IV. Выводы

1. По имеющимся экспериментальным данным для стойких КМОП технологий 2 мкм и 130 нм определены параметры «электро-термо-рад» моделей МОПТ для схемотехнического анализа стойких схем.

2. Результаты расчетов характеристик КМОП схем (c указанными проектными нормами) при одновременном влиянии повышенной температуры и полученной дозы облучения с использованием разработанных моделей удовлетворительно совпадают результатами измерений этих схем, с опубликованными в литературе.

3. Результаты расчетов показали, что совместное воздействие повышенной (более 100°С) температуры и дозы облучения может приводить к существенно большему (около 2-х раз) ухудшению динамических параметров цифровых схем по сравнению с воздействием только температуры или радиации. Это необходимо учитывать при расчетах КМОП схем с учетом внешних воздействий.

Статья подготовлена в ходе выполнения проекта ТЗ-94 в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ)» и гранта РФФИ № 18-07-00898 в 2018 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. R. Schwank, F. W. Sexton, D. M. Fleetwood, R. V. Jones, R. S. Flores, M. S. Rodgers, and K. L. Hughes. Temperature effects on the radiation response. of MOS devices // IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 35. 1988 P. 1432-1437.
- [2] P.V. Dressendorfer, V.J. Dandini, J.R. Schwank. High temperature silicon on insulator electronics for space nuclear power systems: Requirements and feasibility// IEEE Transactions on Nucl. Scie., vol.35, no.5, 1988. P.1099-1112.
- [3] Kharitonov I.A. Electro-Thermo-Rad SPICE models for SOI/SOS MOSFETs // Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 27 – October ., 2017. P. 409--416.

- [4] Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Sambursky L. M., Mokeev A. S. Rad-Hard Versions of SPICE MOSFET Models for Effective Simulation of SOI/SOS CMOS Circuits Taking into Account Radiation Effects// Proc. of the 24th European conference on radiation and its effects on components and systems -2015 (RADECS 2015), Moscow, Russia. 2015. P. 23-26.
- [5] Ph. M. Campbell and C. W. Bogdan. Analytical Models for Total Dose Ionization Effects in MOS Devices.// Sandia report. Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico. 2008. P. 1178 – 1185.
- [6] V. Lakshmanna and A. S. Vengurlekar. Logarithmic detrapping response for holes injected into SiO2 and the influence of thermal activation and electric field// Journal of Applied Physics. Vol. 63, 1988. P. 4548-4555.
- [7] D.B. Brown ; W.C. Jenkins. A.H. Johnston. Application of a model for treatment of time dependent effects on irradiation of microelectronic devices.// *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* Vol. 36, Issue: 6. 1989. P. 1954 – 1962.
- [8] W. Seidler, D. Walters, J. Florian, H. Harper, S. Lutjens, M. Salazar, D. Alexander, A. Smith, Temperature-Dependent Dose Rate Effects in CMOS/SOS Devices// IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol. 41, no. 5, 1994, P.1770-1779.
- [9] E.H. Boufouss, L.A. Francis, V. Kilchytska, P. Gerard, Pascal S. and D. Flandre. Ultra-Low Power High Temperature and Radiation Hard Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) Silicon-on-Insulator (SOI) Voltage Reference // Sensors 2013. 13. P. 17265-17280.
- [10] D.M. Fleetwood; P.S. Winokur, J.R. Schwank. Using laboratory X-ray and cobalt-60 irradiations to predict CMOS device response in strategic and space environments// IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-35, P. 1497-1506.
- [11] D. M. Fleetwood, P. V. Dressendorfer, and D. C. Turpin. A reevaluation of worst-case postirradiation response for hardened MOS transistors // IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. NS-34. No. 6.1987. P.1178-1185.
- [12] URL: https://people.rit.edu/lffeee/CMOS.htm (дата обращения: 21.04.2018).

# SPICE Simulation of CMOS Circuits Behavior for Extreme Ambient Applications Using "Electro-Thermo-Rad" Models

## I.A. Kharitonov

National Research University "Higher School of Economics" (Moscow Institute of Electronics and Mathematics), ikharitonov@hse.ru

Abstract — Using published MOSFETs characteristic degradation after TID irradiation in various thermal ambient parameters of "electro-thermo-rad" SPICE models were defined. Two examples were considered: radiation hardened 2  $\mu$ m CMOS technology of Sandia National Laboratory and 130 nm CMOS technology. Models were verified using SRAM sell simulation (for 2  $\mu$ m technology) and voltage reference, ring oscillator and logic gates circuit (for 130 nm technology). For the cases when elevated temperature leads to enhanced interface traps generation in MOSFET oxides, the paper presents quantitative estimates for the increased degradation of mentioned circuits

characteristics under the mentioned external conditions. The importance taking into account the combined temperature and total dose influence on CMOS circuit is shown.

*Keywords* — CAD systems, CMOS, ambient temperature, total ionizing dose, threshold voltage, mobility, oxide charge, interface states, SPICE models, electro-thermo-rad model, SRAM cell, ring oscillator, NAND circuit, radiation hardness.

#### REFERENCES

- [1] J. R. Schwank, F. W. Sexton, D. M. Fleetwood, R. V. Jones, R. S. Flores, M. S. Rodgers, and K. L. Hughes. Temperature effects on the radiation response. of MOS devices // IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 35. 1988 P. 1432-1437.
- [2] P.V. Dressendorfer, V.J. Dandini, J.R. Schwank. High temperature silicon on insulator electronics for space nuclear power systems: Requirements and feasibility// IEEE Trans. on Nucl. Scie., vol.35, no.5, 1988. P.1099-1112.
- [3] Kharitonov I.A. Electro-Thermo-Rad SPICE models for SOI/SOS MOSFETs // Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 27 – October ., 2017. P. 409--416.
- [4] Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Sambursky L. M., Mokeev A. S. Rad-Hard Versions of SPICE MOSFET Models for Effective Simulation of SOI/SOS CMOS Circuits Taking into Account Radiation Effects// Proc. of the 24th European conference on radiation and its effects on components and systems -2015 (RADECS 2015), Moscow, Russia. 2015. P. 23-26.
- [5] Ph. M. Campbell and C. W. Bogdan. Analytical Models for Total Dose Ionization Effects in MOS Devices.// Sandia report. Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico. 2008. P. 1178 – 1185.
- [6] V. Lakshmanna and A. S. Vengurlekar. Logarithmic detrapping response for holes injected into SiO2 and the

influence of thermal activation and electric field// Journal of Applied Physics. Vol. 63, 1988. P. 4548-4555.

- [7] D.B. Brown ; W.C. Jenkins. A.H. Johnston. Application of a model for treatment of time dependent effects on irradiation of microelectronic devices.// IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. 36, Issue: 6. 1989. P. 1954 – 1962.
- [8] W. Seidler, D. Walters, J. Florian, H. Harper, S. Lutjens, M. Salazar, D. Alexander, A. Smith, Temperature-Dependent Dose Rate Effects in CMOS/SOS Devices// IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol. 41, no. 5, 1994, P.1770-1779.
- [9] E.H. Boufouss, L.A. Francis, V. Kilchytska, P. Gerard, Pascal S. and D. Flandre. Ultra-Low Power High Temperature and Radiation Hard Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) Silicon-on-Insulator (SOI) Voltage Reference // Sensors 2013. 13. P. 17265-17280.
- [10] D.M. Fleetwood; P.S. Winokur, J.R. Schwank. Using laboratory X-ray and cobalt-60 irradiations to predict CMOS device response in strategic and space environments// IEEE Trans. on Nucl. Sci. Vol. NS-35, P. 1497-1506.
- [11] D. M. Fleetwood, P. V. Dressendorfer, and D. C. Turpin. A reevaluation of worst-case postirradiation response for hardened MOS transistors // IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. NS-34. No. 6.1987. P.1178-1185.
- [12] URL: https://people.rit.edu/lffeee/CMOS.htm ((access date: 21.04.2018).