

УДК 621.3.084.89

ВЫБОР ПОРОГА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ КМОП СХЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

д-р техн. наук, проф. А.И. БЕЛОУС

(ОАО «ИНТЕГРАЛ, Минск»);

д-р физ.-мат. наук Ю.В. БОГАТЫРЕВ

(Научно-практический центр по материаловедению НАН Беларуси, Минск);

канд. техн. наук Е.А. ВЕРНИКОВСКИЙ

(Белорусский государственный университет, Минск);

д-р техн. наук А.В. ПРИБЫЛЬСКИЙ

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Приведены схемотехнические и топологические решения для повышения радиационной стойкости интегральных схем за счет учета изменения порога переключения элементарного КМОП-вентилля при воздействии ионизирующего излучения. Приведена качественная и количественная оценка влияния ионизирующего излучения на параметры транзисторов в зависимости от конструктивно-топологических характеристик. Определены численные значения порога переключения в зависимости от уровня воздействия ионизирующего излучения. Предложены конкретные рекомендации по выбору порога переключения КМОП схем, работающих в условиях ионизирующего излучения, что позволяет выбрать его оптимальное значение на стадии проектирования.

Введение. Разработка радиационно-стойких КМОП интегральных схем в настоящее время является одним из основных направлений развития современной микроэлектроники, поскольку кроме известных специфических задач разработчиков радиоэлектронного оборудования для систем двойного и специального назначения появились новые сферы применения этого вида микроэлектронных изделий – оборудование систем управления защитой атомных станций, бортовые системы управления и обработки информации космических летательных аппаратов, спутниковых систем телеметрии и навигации и т.п. [1]. Поэтому при проектировании интегральных микросхем с повышенной радиационной стойкостью необходимо учитывать численные изменения параметров элементной базы (транзисторов) под действием ионизирующего излучения и применять специальные технические решения, направленные на повышение работоспособности микросхем в условиях воздействия различного рода ионизирующих излучений, в том числе воздействия факторов космического пространства.

Особенности работы КМОП схем можно определить, анализируя работу базового элементарного вентилля (рис. 1) и его передаточную характеристику (рис. 2).

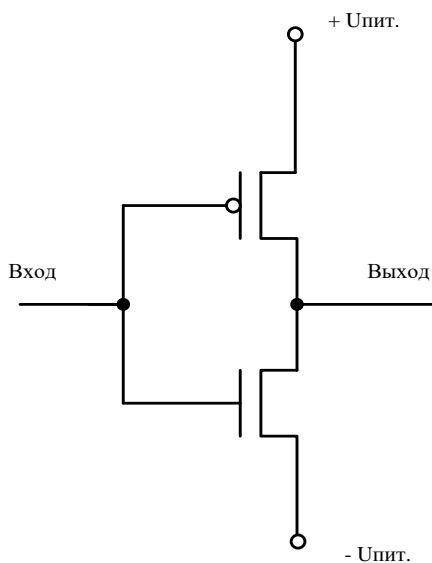


Рис. 1. Схема элементарного вентилля

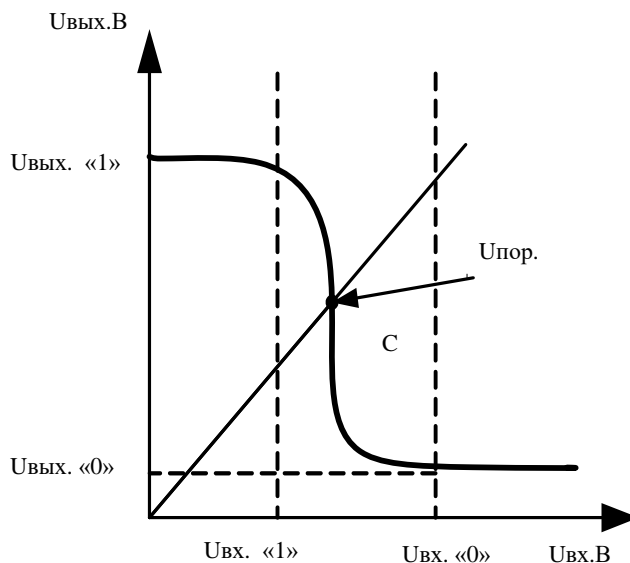


Рис. 2. Передаточная характеристика элементарного вентилля

По передаточной характеристике определяются основные параметры работы интегральной схемы, в том числе диапазон работоспособности, помехоустойчивость, порог переключения, амплитуда выходного

сигнала. Проектирование КМОП схем должно проводиться с учетом воздействия всех внешних дестабилизирующих факторов, таких как ионизирующие излучения, изменение величины напряжения питания. Учет влияния ионизирующего излучения на работоспособность микросхем – наиболее сложный этап при проектировании КМОП схем.

Рассмотрим **особенности проектирования на примере элементарного вентиля**, так как построение даже больших схем в комплементарном базисе основано на элементарном вентиле. Поэтому результаты проектирования элементарного вентиля с учетом влияния ионизирующего излучения правомерно распространить на оценки работоспособности схем, состоящих из тысяч вентиляей.

Теоретическая часть. Стойкость схем к воздействию радиации может быть обеспечена не только за счет применения радиационно-стойких технологических процессов, но и соответствующими схемотехническими и топологическими решениями. С этой целью более подробно рассмотрим этап проектирования вентиля, в частности процесс переключения вентиля, надежная работа которого в первую очередь зависит от правильного выбора его порога переключения.

Проанализируем передаточную характеристику элементарного инвертора, показанную на рисунке 1. Точка *C* соответствует точке на характеристике, когда входное напряжение равно выходному. Входное напряжение для этой точки называется *точкой переключения (порогом переключения)* инвертора U_n , и оба МОП транзистора работают в режиме насыщения.

Токи стоков *p*-канального и *n*-канального МОП транзисторов равны, следовательно, для точки *C* можем записать следующее выражение [2; 3]:

$$\psi_n (U_n - V_{t0n}) / 2 = \psi_p (V_{dd} - U_n - V_{t0p}) / 2, \tag{1}$$

где $\psi = K \cdot W / L$ (K – удельная крутизна МОП транзистора, $K = \mu \cdot C$ (μ – подвижность носителей, (μ_n – подвижность электронов, μ_p – подвижность дырок); C – удельная емкость затвора МОП транзистора; W – ширина затвора; L – длина затвора); V_{t0n} – пороговое напряжение *n*-канального транзистора; V_{t0p} – пороговое напряжение *p*-канального транзистора.

Решая уравнение (1) относительно U_n , получим следующее выражение для напряжения переключения инвертора:

$$U_{пор} = \frac{\left[\left(\sqrt{\psi_n / \psi_p} \right) \cdot V_{t0n} + (V_{dd} - V_{t0p}) \right]}{\left(1 + \sqrt{\psi_n / \psi_p} \right)}. \tag{2}$$

Оценим влияние ψ_n и ψ_p на напряжение переключения U_n инвертора.

На рисунке 3 показаны передаточные характеристики инвертора для разных величин отношения ψ_n / ψ_p , при этом напряжение питания $U_{пит} = 5V$.

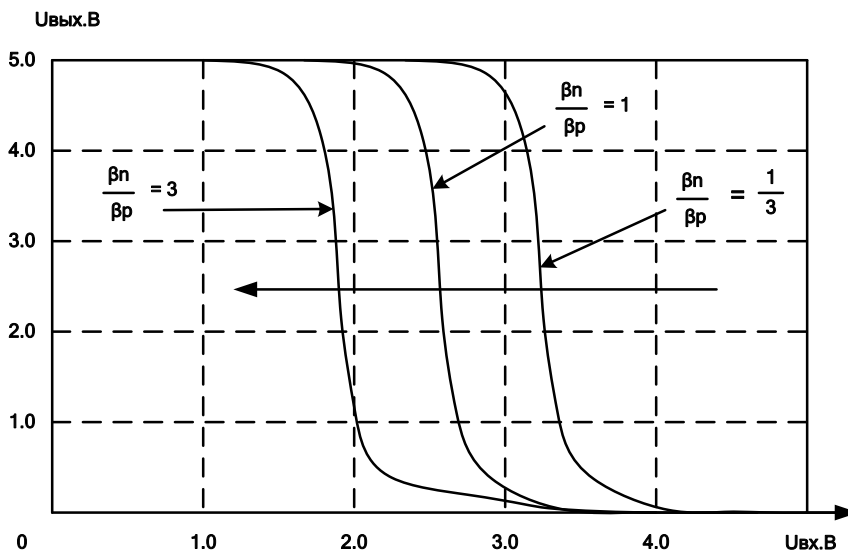


Рис. 3. Передаточные характеристики для различных значений ψ_n / ψ_p

Напряжение переключения U_n зависит от отношения крутизны транзисторов инвертора. При значении $\psi_n / \psi_p = 1$ напряжение переключения $U_n \approx U_{пит} / 2 = 2,5 V$, т.е. равно половине напряжения питания.

В этом случае при одинаковых длинах затвора ширина затвора p -канального транзистора W_p должна быть приблизительно в 3 раза больше ширины затвора n -канального транзистора W_n , так как подвижность электронов приблизительно в три раза больше подвижности дырок, т.е. $Kp_n \approx 3Kp_p$. При этом передаточная характеристика симметрична, и выходные сопротивления при обоих выходных сигналах одинаковы. В случае если варьировать только ширину затвора, разработчик микросхемы может регулировать численное значение напряжения порога переключения схемы. Передаточная характеристика при этом позволяет определить полный рабочий диапазон функционирования вентиля, зависящий от предъявляемых к схеме конкретных требований, например, учесть соответствующее влияние конкретного вида ионизирующего излучения [2; 3]. С этой целью рассмотрим влияние ионизирующего излучения на основные рабочие параметры транзистора, в частности, рассмотрим важнейшие характеристики – зависимость величины сдвига порогового напряжения n -канального транзистора от толщины подзатворного окисла и зависимость величины сдвига пороговых напряжений от основных геометрических характеристик транзистора: длины L и ширины канала W .

Экспериментальная часть. С целью определения качественных и количественных характеристик влияния ионизирующего излучения на параметры транзисторов по разработанному базовому маршруту в условиях серийного производства ОАО «Интеграл» были изготовлены пластины с тестовыми n -канальными транзисторами, затем транзисторы были собраны в металлокерамические корпуса.

Испытания собранных образцов проводились на установке с источником Co при заданной мощности дозы $3 \cdot 10^6$ рад/с. При измерениях параметров транзисторов на затворы (с толщиной подзатворного окисла порядка 300 \AA) подавалось напряжение $+5 \text{ В}$.

На рисунке 4 приведена гистограмма распределения сдвига порогового напряжения исследуемых транзисторов. Определено, что сдвиг максимального значения порогового напряжения не превышает $0,32 \text{ В}$.

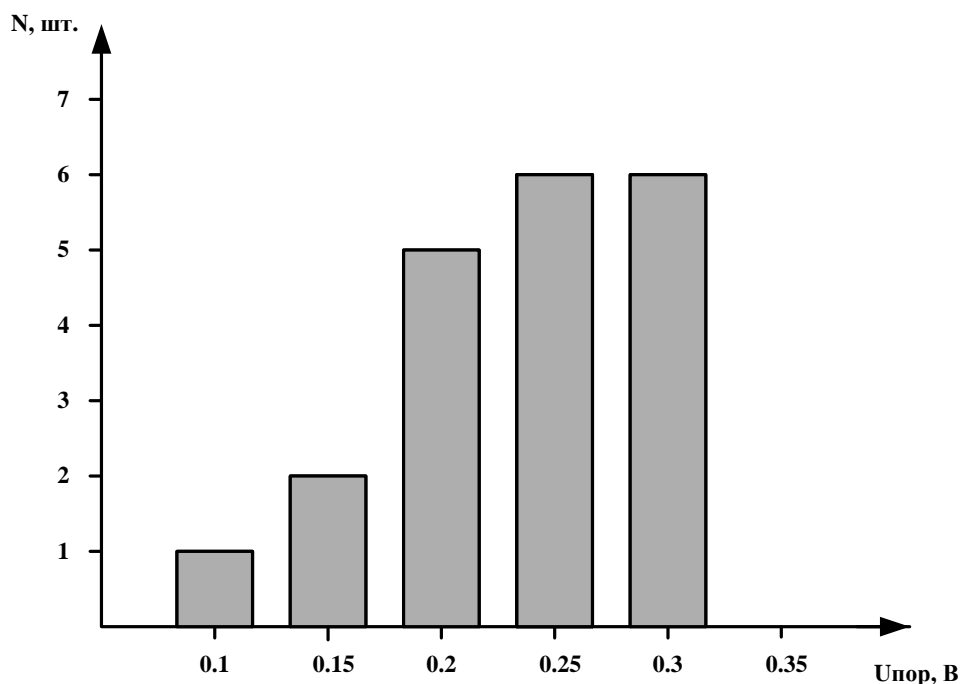


Рис. 4. Гистограмма распределения сдвига порогового напряжения

В ходе проведения дальнейших исследований был определен ряд важных для практического приложения зависимостей. На рисунке 5 представлена полученная зависимость сдвига порогового напряжения n -канального транзистора от толщины подзатворного окисла после облучения дозой 10 рад. Из полученных данных видно, что при толщине окисла порядка 300 \AA сдвиг порогового напряжения равен $\sim 0,25 \text{ В}$. Также для выбранной группы транзисторов определялось значение сдвига пороговых напряжений при изменении L и W : L , численные значения которых варьировались для L от $1,5$ до 50 мкм , W – от 50 до 975 мкм . Дозовые зависимости сдвига (ΔV) пороговых напряжений транзистора с различными соотношениями длины и ширины канала показаны на рисунке 6.

Полученные результаты (см. рис. 6) позволяют оценить численное значение величины сдвига порогового напряжения транзистора в зависимости от его конструктивно-топологических характеристик с учетом конкретных условий эксплуатации проектируемой микросхемы.

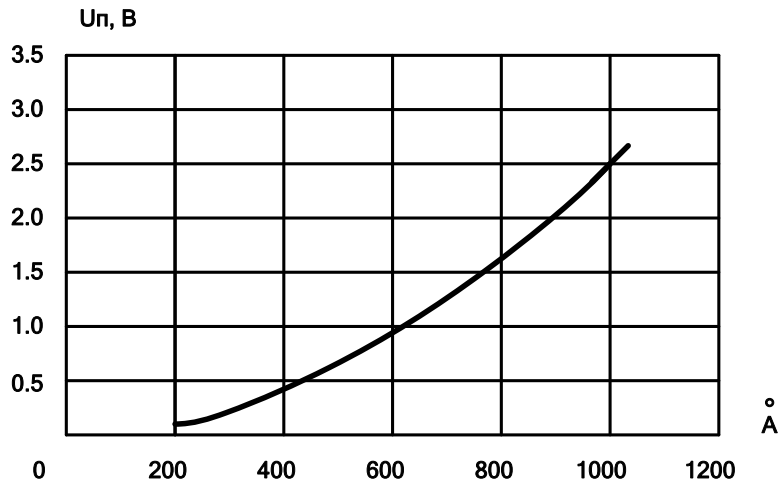


Рис. 5. Зависимость сдвига порогового напряжения n -канального транзистора от толщины подзатворного окисла (для дозы облучения 10^6 рад)

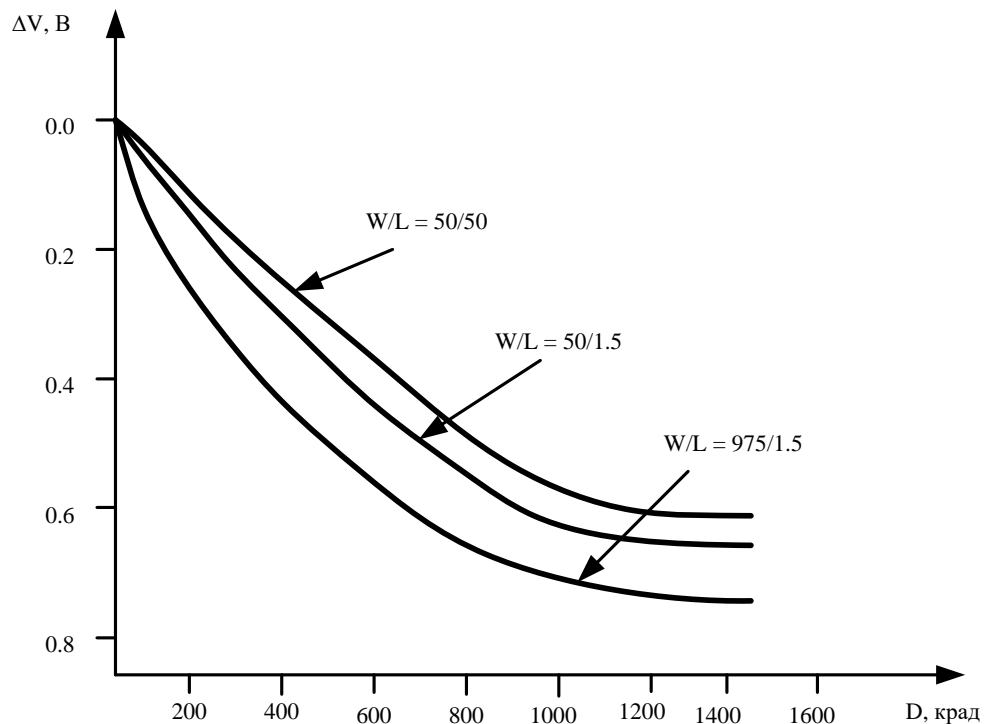


Рис. 6. Дозовые зависимости радиационного сдвига пороговых напряжений n -канальных транзисторов для различных соотношений ширины W и длины L канала

На рисунке 7 представлена зависимость порога переключения стандартного вентиля при дозе облучения $D = 10^5$ рад в зависимости от напряжения питания. Данная зависимость позволяет установить, что в диапазоне напряжения питания 3...6 В сдвиг порога переключения стандартного вентиля составляет около 0,36 В (в сторону уменьшения) и изменяется незначительно.

Обсуждение результатов. Для достижения высоких эксплуатационных характеристик разрабатываемых КМОП схем, в том числе и при воздействии ионизирующих излучений, необходимо учитывать как дозовые зависимости основных параметров транзисторов, так и вытекающие из их анализа схемотехнические и топологические возможности контролируемого изменения основных параметров схем (вентиля) [4; 5]. В рассмотренном конкретном случае приведенные данные позволяют оценить изменение параметров транзисторов от его геометрических размеров и влияние этих изменений на порог переключения вентиля. Суммируя максимальные изменения параметров транзистора, можно оценить максимальное снижение порога переключения вентиля, которое в нашем случае составляет примерно 1 В. Как было

показано выше, порог переключения КМОП-вентиля равен 2,5 В. Однако при воздействии всех дестабилизирующих факторов порог переключения вентиля может снижаться до 1,5 В, что при рабочем диапазоне напряжения питания 3...6 В может приводить к отказу функционирования вентиля. Следовательно, для обеспечения надежного функционирования порог переключения стандартного вентиля проектируемой радиационно-стойкой микросхемы должен быть не менее 3,5 В. Это касается как самого стандартного базового вентиля, так и всех КМОП схем, построенных на таком базисе. Указанный порог переключения может быть обеспечен топологическими методами.

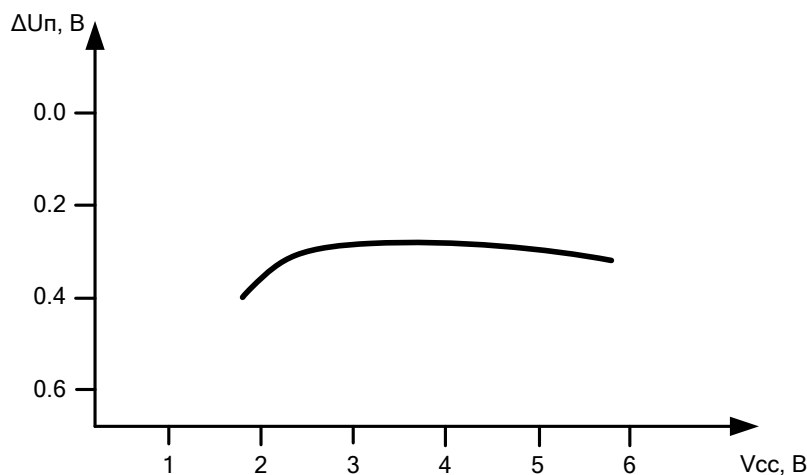


Рис. 7. Зависимость порога переключения стандартного вентиля от напряжения питания при дозе облучения $D = 10^5$ рад

Заключение. В результате проведенных исследований определены диапазоны изменения параметров основных транзисторов и численные значения порога переключения стандартного вентиля в зависимости от уровня воздействия ионизирующего излучения. Полученные данные позволяют на этапе схемотехнического и топологического проектирования предусматривать необходимые конструктивные изменения транзисторов, что существенно повышает надежность работы КМОП схем и электронных устройств на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метод прогнозирования радиационной стойкости КМОП интегральных схем / Ф.П. Коршунов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – М.: Изд-во «Научно-исследовательский институт приборов», 2009. – Т. 1. – С. 45 – 49.
2. Вологдин, Э.Н. Радиационная стойкость биполярных транзисторов: учеб. пособие / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. – М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 1999. – 101 с.
3. Никифоров, А.Ю. Радиационные эффекты в КМОП ИС / А.Ю. Никифоров, В.А. Телец, А.И. Чумаков. – М.: Радио и связь, 1994. – 164 с.
4. Прибыльский, А.В. // Радиационная стойкость электронных систем («Стойкость-2001»): материалы конф., Москва, 2011 г. – М., 2001. – Вып. 4 (57).
5. Доклады НАН Беларуси / Ф.П. Коршунов [и др.]. – 2004. – № 5, Т. 48.

Поступила 22.11.2012

SELECTION OF CMOS CIRCUIT COMMUTATION AT IONIZING RADIATION IMPACT

A. BELOUS, Y. BOGATYREV, E. VERNIKOUSKI, A. PRYBYLSKI

Circuit and topological solutions for increasing of radiation resistance of integrated circuits at the expense of the record of changes of switching threshold of an elementary CMOS-valve under the influence of ionizing radiation are given. Qualitative and quantitative evaluation of the influence of ionizing radiation on the parameters of transistors depending on constructional-topological characteristics is given. Figures of a switching threshold depending on the level of impact of ionizing radiation are defined. Concrete recommendations on the choice of a switching threshold of CMOS circuits, working in the conditions of ionizing radiation, which allows to choose its optimal value at the stage of projecting, are proposed.