

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СБОЕВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОДИНОЧНОГО ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ

Обеспечение безопасного функционирования больших интегральных схем (БИС) требует учета влияния одиночных импульсов напряжения (ОИН) различной природы. Как известно, основными источниками ОИН являются: электромагнитные излучения естественного и искусственного происхождения; электростатические разряды; разряды, вызванные накоплением заряда в БИС космических аппаратов при воздействии излучений [1].

При этом диапазон возможных амплитуд импульсов широк — от единиц вольт до киловольт. Поэтому процессы, происходящие в БИС современных технологий, не описываются в рамках одной модели повреждения, а носят комплексный характер. При этом по времени, характеру развития и влиянию на параметры БИС эффекты разделяются на первичные и вторичные, которые, в свою очередь, делятся на переходные и остаточные.

Первичные эффекты развиваются за счет энергии самого ОИН непосредственно во время его действия. К первичным эффектам следует отнести: сбой и потерю информации в элементах, тепловой разогрев, пробой подзатворного диэлектрика, лавинный и туннельный пробой. Для развития вторичных эффектов необходимо накопление энергии во внутреннем объеме области полупроводника.

По характеру влияния на параметры элементов первичные и вторичные эффекты делятся на обратимые и необратимые.

Первичные эффекты вызывают временную потерю работоспособности БИС под действием наведенных токов и напряжений, которая проявляется в форме сбоя, изменения внутреннего состояния элемента, выхода режима БИС за допустимые пределы. В этом случае после воздействия ОИН происходит восстановление работоспособности элемента через время потери работоспособности $t_{пр}$ [2].

Остаточные эффекты могут иметь параметрический характер или форму катастрофического отказа.

Таким образом, влияние ОИН на параметры БИС проявляется в следующих формах: время потери работоспособности; деградация электрических параметров; снижение надежности; катастрофический отказ.

При описании таких БИС, как правило, используют представление ее модели в виде композиции двух цифровых автоматов — управляющего и операционного [3]. Такая модель не отражает зависимость импульсной электрической прочности (ИЭП) от структурной, схемотехнической организации БИС и технологии производства. В связи с этим практически невозможно получить конкретные параметры, позволяющие оценить ИЭП и заложенные схемотехнические и структурные решения БИС [4].

Такая задача реализуема, если перейти к использованию метода критериальных функций принадлежности (КФП) в виде автомата Брауэра, в котором каждому логическому состоянию БИС сопоставляется функция принадлежности μ , характеризующая истинность принадлежности его логическому «0» или «1», которые определяются по критериям работоспособности [5].

КФП для остаточных радиационных эффектов определяется как:

$$\mu^j(F) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_H^j(F), \text{ при } U_{ex} < U_{ex.zp}(F) \\ 1 - \frac{1}{2} K_H^j(F), \text{ при } U_{ex} \geq U_{ex.zp}(F) \end{cases},$$



где $K_H^j(F) = \frac{|U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}}, F) - U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})|}{\max|U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}}, F) - U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})|}$ – коэффициент неточности, который определяется как нормированный модуль разности между измененной под действием ОИН статической переключательной характеристикой ($U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}}, F)$) и первоначальной ($U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$); j – логическое состояние, для которого строится КФП.

В случае временной потери работоспособности БИС КФП представляет функцию $\mu(t, U_m)$, где t – время с момента начала ОИН с амплитудой $U(0)$:

$$\mu(t, U_m) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_H(t, U_m) \\ 1 - \frac{1}{2} K_H(t, U_m) \end{cases},$$

где $K(t, U_m) = \frac{|U_{\text{вых}}(t, U_m) - S(t, U_m)|}{\max|U_{\text{вых}}(t, U_m) - S(t, U_m)|}$; $S(t, U_m)$ – пороговая реакция логического элемента.

Для сравнения КФП различных реализаций БИС вводятся специальные характеристики в виде функций: работоспособности, чувствительности и неоднородности.

Функция работоспособности характеризует степень отличия результата функционирования после воздействия ОИН от результата функционирования исправной БИС:

$$\psi(U_m) = \xi(\bar{X}^n, \bar{D}^n, \bar{\mu}(U_m)) \oplus \xi(\bar{X}^n, \bar{D}^n, \bar{\mu}(0)), \quad (1)$$

где ξ – нечеткие функции; n – номер цикла функционирования БИС; \bar{X} – входные сигналы; \bar{D} – информационные сигналы; $\bar{\mu}$ – вектор КФП.

В граничных точках функция работоспособности принимает вид:

$$\psi = \begin{cases} 0, \text{ если БИС полностью работоспособна;} \\ 1, \text{ если БИС полностью неработоспособна.} \end{cases}$$

Для прогнозирования ИЭП БИС на схемотехническом и структурном уровнях описания модель автомата Брауэра имеет вид:

$$\bar{Y} = \bar{Q}(\bar{X}, \bar{Z}, \bar{\mu}(U_m)), \quad (2)$$

где \bar{X}, \bar{Y} – векторы входных и выходных переменных цифровых устройств соответственно; \bar{Z} – вектор внутреннего состояния БИС; $\bar{\mu}(U_m)$ – набор КФП, описывающий поведение элементов при воздействии ОИН; \bar{Q} – вектор нечетких функций.

В соответствии с выражением (1) функция работоспособности отдельных узлов БИС по j -му выходу при i -м входном наборе сигналов и m -м внутреннем состоянии имеет вид:

$$\psi_j(\bar{X}_i, \bar{Z}_m, U_m) = Q_j(\bar{X}_i, \bar{Z}_m, \bar{\mu}(U_m)) \oplus Q_j(\bar{X}_i, \bar{Z}_m, \bar{\mu}(0)). \quad (3)$$

Обобщенная функция работоспособности (ФР) цифрового устройства на основе выражения (3) имеет вид:

$$\psi(U_m) = \max \psi_j(U_m) = \max \psi(\bar{X}_i, \bar{Z}_m, U_m). \quad (4)$$

БИС реализуется на большом количестве элементов, характеристики каждого из которых в различной степени влияют на значения ФР всего цифрового устройства. Для выявления таких элементов вводится функция чувствительности $\Phi P(\psi_j)$. Чувствительность ФР к варьированию характеристик отдельных элементов (μ_j) можно определить через отношения приращения ФР, связанных с изменением этих величин, которые в однопараметрическом случае имеют следующий вид:

$$\Delta_j(\mu_{ir}, U) = \frac{H[\psi_j(\mu_{ir}(U'), \bar{\mu}_i(U')), \psi_j(\mu_{ir}(U^0), \bar{\mu}_i(U^0))]}{H[\mu_{ir}(U'), \mu_{ir}(U^0)]}, \quad (5)$$



где $\vec{\mu}_i$ — векторный параметр, или переменная, по которой варьируется координата μ_i ; ψ_j — ФР цифрового устройства.

Выражение (5) используется для локализации доминирующего элемента, обуславливающего отказ в данном логическом состоянии цифрового устройства в целом. Элемент цифрового устройства, имеющий наихудшую ИЭП, т. е. $\max \mu_i(U_m)$, характеризуется как критический элемент. Граничные значения для $\Delta_j(\mu_{ir}, U)$ определяются следующим образом:

$$\Delta_j(\mu_{ir}, (U)) = \begin{cases} 0, & \text{если элемент с } \mu_{ir} \text{ не доминирует при заданном } U; \\ 1, & \text{если элемент с } \mu_{ir} \text{ доминирует при заданном } U. \end{cases}$$

В ходе проведенных исследований была выявлена ярко выраженная зависимость ИЭП от структурной организации БИС, когда критический и доминирующий элементы различны в пределах заданного статистического технологического разброса [6]. Для обеспечения стойкости структурно-неоднородных БИС по критерию ИЭП, помимо традиционных методов, необходимо использовать структурные методы, связанные с изменением структурной организации БИС при сохранении реализуемой Булевой функции. Выражение для оценки уровня структурной неоднородности БИС имеет следующий вид:

$$\Delta U^c = \sup H |U_{КЭ}(\vec{X}_i), U_{ДЭ}(\vec{X}_i)|, \quad (6)$$

где $U_{КЭ}(\vec{X}_i), U_{ДЭ}(\vec{X}_i)$ — уровень нарушения работоспособности критических и доминирующих элементов (КЭ, ДЭ) при i -м режиме функционирования.

Таким образом, процесс прогнозирования функциональных отказов можно представить в виде определенной последовательности этапов:

- оценка существующей элементной базы БИС с точки зрения определения КФП по критерию ИЭП;
- определение функции работоспособности БИС по выражениям (1) — (4);
- определение функции чувствительности по формуле (5);
- оценка уровня структурной неоднородности из выражения (6);
- окончательное определение уровня ИЭП как отдельных блоков БИС, так и БИС в целом с учетом приведенных выше исходных данных.

Для апробации предложенного метода КФП определения стойкости к ОИН и ее характеристик были проведены экспериментальные исследования по оценке ИЭП КМОП БИС ОЗУ 537РУ6 по выводам питания в широком диапазоне изменения U_m . Результаты испытаний стойкости БИС по выводам питания приведены на рис. 1. Наблюдались три типа нарушений работоспособности, которые проявлялись в следующей последовательности относительной единой шкалы амплитуд ОИН: информационные сбои, параметрические отказы, защелкивание паразитных четырехслойных структур и необратимые повреждения, вызванные развитием вторичных эффектов (рис. 1). На рис. 2 приведены экспериментально измеренные графики зависимости числа сбившихся ячеек памяти БИС ОЗУ 537РУ6 от амплитуды ОИН, воздействующей по цепи питания. Информационные сбои имеют место при длительностях ОИН 1 и 10 мкс. Длительность ОИН 0,1 мкс недостаточна для перезаряда внутренних паразитных емкостей и искажения информации, а также для развития эффектов необратимого повреждения, требующего определенного порогового уровня.

При увеличении длительности импульса с 1 до 10 мкс уровень напряжения U_m , необходимый для обратимого напряжения ИС, уменьшается с 240 до 100 В.



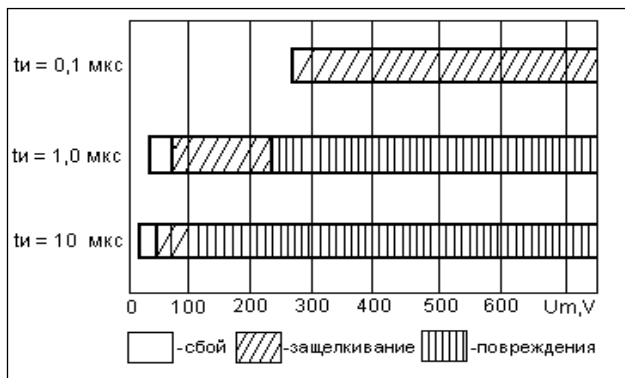


Рис. 1. Типы и области нарушений работоспособности БИС ОЗУ 537РУ6 по цепи питания при воздействии ИЭП различной длительности

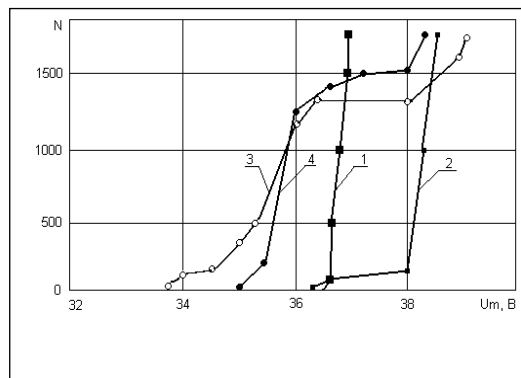


Рис. 2. Зависимость числа сбившихся ячеек БИС ОЗУ 537РУ6 от амплитуды ОИН, действующей по цепи питания: 1 – «поле нулей», $t_u = 1$ мкс; 2 – «поле единиц», $t_u = 1$ мкс; 3 – «поле нулей», $t_u = 10$ мкс; 4 – «поле единиц», $t_u = 10$ мкс

Информационные сбои происходят в сравнительно узком диапазоне амплитуд ОИН — от 34 до 42 В. При дальнейшем увеличении амплитуды ОИН происходит защелкивание, приводящее к полной потере информации. При этом следует отметить, что стойкость БИС с записанной информацией «поле единиц» более высокая к воздействию ОИН по сравнению с «полем нулей». Разброс числа сбившихся ячеек в различных образцах БИС ОЗУ при одинаковой амплитуде ОИН доходит до 70 %.

Предложенная в работе система оценки уровня информационной безопасности БИС к ОИН достаточно универсальна и удобна в применении. Основным ее достоинством является унификация условий испытаний, позволяющая сравнивать и контролировать уровни стойкости по различным эффектам в ИС к ОИН, в том числе функционально сложным.

Предложен алгоритм прогнозирования функциональных отказов БИС на основе метода критериальных функций принадлежности. Показана необходимость учета структурной неоднородности в БИС при воздействии ОИН, приводящей к отличию в пороге отказа.

Результаты экспериментальных исследований позволили определить уровни стойкости БИС ОЗУ по информационным сбоям, защелкиванию и необратимым эффектам повреждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Рикетс Л. У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1979. — 328 с.
2. Мырова Л. О., Чепиженко А. Э. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1988. — 296 с.
3. Шрейдер Ю. А., Шаров А. А. Системы и модели. М.: Радио и связь, 1986. — 152 с.
4. Аствацатурьян Е. Р., Беляев В. А., Скоробогатов П. К. Использование метода критериальных функций принадлежности для теоретического моделирования и экспериментального исследования радиационного поведения АПОИ на базе ИМС высокой степени интеграции // Специальная техника средств связи. Серия общетехническая. 1987. Вып. 11. С. 3–12.
5. Барбашов В. М., Трушкин Н. С. Прогнозирование безопасности функционирования микропрограммных БИС в условиях возникновения информационных сбоев // Безопасность информационных технологий. 2008. № 2. С. 61–64.
6. Аствацатурьян Е. Р., Барбашов В. М., Беляев В. А., Приходько П. С. Функционально-логическое моделирование радиационных отказов БИС // Специальная радиоэлектроника. 1993. Вып. 7–9. С. 15–19.

