

Оценка стойкости КМОП СБИС к фактору поглощенной дозы при воздействии импульсного излучения

А.В. Согоян

ЭНПО «Специализированные электронные системы», avsoag@spels.ru

Аннотация — Предложен и обоснован метод испытаний КМОП СБИС на стойкость к фактору поглощенной дозы при воздействии импульсного ионизирующего излучения высокой интенсивности по результатам анализа реакции БИС в поле излучения последовательности импульсов относительно невысокой интенсивности. Подход позволяет оценить уровни радиационной стойкости КМОП БИС на малых моделирующих установках при наборе дозы в режиме серии импульсов. Консервативность обеспечивается по отношению к процессам переноса и релаксации заряда в окисле МОП-структур и не зависит от полевого режима и топологии образца.

Ключевые слова — СБИС; излучение; доза; мощность дозы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших факторов, определяющих радиационную стойкость сверхбольших интегральных схем (СБИС), выполненных по технологии КМОП СБИС при воздействии импульсного ионизирующего излучения (ИИ) высокой интенсивности, является потеря работоспособности вследствие дозовой деградации характеристик. Функциональный и параметрический отказ современных КМОП СБИС при накоплении дозы ИИ обусловлен преимущественно формированием радиационно-индуцированного заряда (РИЗ) в изолирующих диэлектрических структурах [1]. При этом за счет процессов релаксации РИЗ спустя некоторое время после воздействия импульса ИИ может наблюдаться восстановление функционирования СБИС [2]. Таким образом, работоспособность СБИС при воздействии импульсного ИИ в общем случае будет определяться как эффектами релаксации неравновесного заряда в полупроводниковой структуре (кратковременные параметрические и функциональные отказы, зашелкивание), так и эффектами накопления и релаксации РИЗ в диэлектрических структурах [3].

Существующая практика испытаний компонентов РЭА на стойкость к воздействию импульсного ИИ предполагает отдельный учет эффектов «мощности дозы» и «накопленной дозы». При этом экспериментальная оценка стойкости СБИС проводится на моделирующих установках при интенсивностях ИИ 10-

1000 рад/с, что может привести к существенной недооценке времени потери работоспособности (ВПР) СБИС [2]. В большинстве случаев возможности электронных ускорителей не позволяют сформировать требуемую поглощенную дозу (более 200 крад) за один импульс в процессе испытаний. Для практического проведения испытаний с использованием импульсных ускорителей желательно определить режимы исследований, при которых обеспечивается возможность оценки работоспособности устройства через заданное время t_0 после гипотетического воздействия одиночного импульса с уровнем D_0 . При этом фактический набор дозы должен осуществляться серией импульсов ускорителя, в каждом из которых формируется доза $D_1 < D_0$, общее время набора дозы превышает величину t_0 , а контроль работоспособности устройства выполняется через некоторое время t_x после окончания серии импульсов (рис.1). Таким образом, задача заключается в определении требуемого числа импульсов n и времени t_x , при которых будет обеспечена консервативная (гарантированно невышенная) оценка уровня стойкости СБИС. В данной работе излагается теоретический подход к решению указанной задачи.

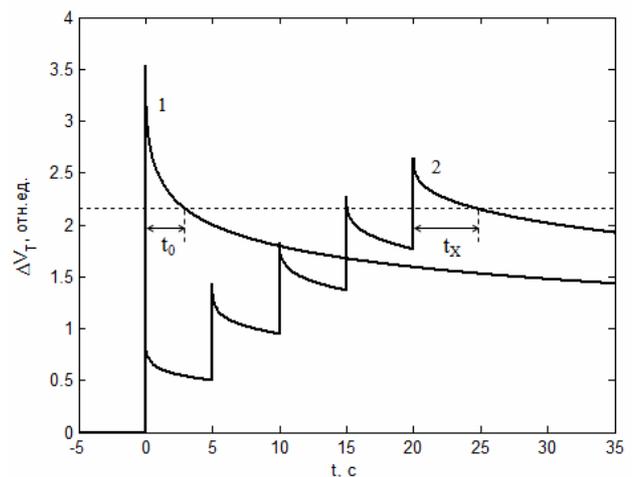


Рис. 1. Иллюстрация соответствия кинетик релаксации сдвига порогового напряжения после воздействия одиночного импульса (1) и серии из 5 импульсов (2)

II. МЕТОД ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ

В современных СБИС геометрия изолирующего окисла паразитной МОП-структуры существенно отличается от плоскопараллельной, а распределение поля в ней – от однородного [2]. В этой ситуации паразитную МОП-структуру можно приближенно представить в виде параллельного соединения элементарных МОП-транзисторов (МОПТ), к каждому из которых применимо предположение об однородности поля в окисле. Каждый элементарный МОПТ, таким образом, будет характеризоваться индивидуальным набором параметров, в частности – пороговым напряжением. Консервативная оценка степени деградации паразитного МОПТ и СБИС в целом может быть достигнута, если сдвиг порогового напряжения элементарного паразитного МОПТ, вызванный суммарным (подвижным и захваченным) зарядом в окисле, в момент контроля после серии из n импульсов $\Delta V_{Tn}(t_x)$ оказывается не меньше сдвига, оставшегося к моменту времени t_0 после предполагаемого воздействия одиночного импульса $\Delta V_{T0}(t_0)$:

$$\Delta V_{Tn}(t_x) \geq \Delta V_{T0}(t_0). \quad (1)$$

Корректный выбор величин n и t_x , обеспечивающих выполнение условия (1), должен учитывать особенности кинетик переноса подвижных носителей в изолирующих окислах и релаксации захваченного заряда дырок.

Основными процессами, определяющими импульсную реакцию МОП-структуры по отношению к дозовым эффектам, являются перенос дырок через окисел паразитных структур и релаксация заряда дырок, захваченных на ловушки [1]. Из анализа, проведенного в работе [2], следует, что процесс релаксации порогового напряжения МОПТ за счет переноса дырок после воздействия n импульсов ускорителя может быть в линейном приближении описан выражением:

$$\Delta V_{Tn}(t) = AD_1 \sum_{i=1}^n K(t - (i-1)T), \quad (2)$$

где $K(t)$ – реакция на одиночный импульс, T – период следования импульсов, A – параметр, зависящий от геометрии структуры, технологии производства и полевого режима. Анализ показывает, что экспериментальные результаты [1] для функции $K(t)$ могут быть с хорошей точностью аппроксимированы выражением:

$$K(t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{t_{1/2}}\right)^\alpha}, \quad (3)$$

где α – коэффициент дисперсионного переноса.

Приближение (3) существенно отличается от теоретических асимптотик, описанных в [1], однако хорошо описывает экспериментальные результаты, что

позволяет применять его на практике. Величина $t_{1/2}$ представляет собой масштабный параметр задачи – время переноса 50% заряда.

С учетом выражений (2) и (3) условие (1) примет вид:

$$\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{1 + \left(\frac{t_x + iT}{t_{1/2}}\right)^\alpha} \geq \frac{D_0}{D_1} \frac{1}{1 + \left(\frac{t_0}{t_{1/2}}\right)^\alpha}. \quad (4)$$

Неравенство (4) определяет зависимость необходимого числа импульсов n от времени t_x , величин α и $t_{1/2}$ при заданных значениях D_0 , D_1 , t_0 , T .

На практике измерение параметров устройства после воздействия импульса ИИ может производиться спустя некоторый минимальный интервал времени t_m , обусловленный наличием помех различной природы, то есть $t_x > t_m$. С учетом того, что зависимость $n(t_x)$ при постоянном значении прочих параметров является возрастающей, минимальное значение n_m может быть получено из условия (4) при $t_x = t_m$. В этом случае соотношение (4) при минимальном n_m определяет зависимость $n_m(t_{1/2}, \alpha)$.

При временах $t_{1/2} \ll t_m$ значение n_m не зависит от величины $t_{1/2}$; в этом случае неравенство (4) будет выполнено при соблюдении условия:

$$\sum_{i=0}^{n_m-1} (t_m + iT)^{-\alpha} = \frac{D_0}{D_1} t_0^{-\alpha}. \quad (5)$$

Уравнение (5) не содержит параметра $t_{1/2}$, определяя асимптотическое поведение величины n_m .

Рассмотрим теперь процесс накопления и релаксации заряда на ловушках при воздействии серии импульсов ускорителя, предполагая, что процессы переноса завершаются за времена, много меньшие периода следования импульсов ускорителя T и времени t_0 . Как и ранее, будем также рассматривать линейную модель отклика, пренебрегая нелинейными эффектами при накоплении заряда. Данный подход является консервативным по отношению к нелинейной модели. В этом случае накопление заряда дырок на ловушках p_t , находящихся на расстоянии z от границы раздела кремний-оксид, может быть описано уравнением [1]:

$$\frac{\partial p_t}{\partial t} = kN(z)P(t) - \nu_0 \exp\left(-\frac{z}{\lambda}\right)p_t, \quad (6)$$

где k – коэффициент, зависящий от параметров технологии и полевого режима, $P(t)$ – мощность дозы ИИ, зависящая от времени, λ – параметр квазиклассического приближения, имеющий размерность длины, ν_0 – «частотный фактор» процесса туннелирования, $N(z)$ – концентрация ловушек. При импульсном облучении можно принять

$$P(t) = D_1 \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^n [\Theta(t - (i-1)T) - \Theta(t - (i-1)T - \tau)],$$

где τ – длительность импульса ускорителя, D_1 – доза, формируемая в объекте испытаний за один импульс, $\Theta(t)$ – функция Хевисайда.

Следуя [1], будем предполагать, что ловушки дырок распределены по экспоненциальному закону в слое толщиной d . В этом случае для поверхностной плотности заряда дырок Q_s из уравнения (6) можно получить:

$$Q_s(t) = \int_0^{\infty} p_i(t, z) dz = kN_s \int_0^t g(t - \xi) P(\xi) d\xi, \quad (7)$$

$$g(\tau) \approx \frac{(1 + \nu_0 \tau)^{-\gamma} - e^{-d/L}}{1 - e^{-d/L}}, \quad \gamma = \frac{\lambda}{L}, \quad (8)$$

где N_s – поверхностная плотность ловушек, L – параметр распределения ловушек.

При $L \gg d$ (однородное распределение дефектов в слое толщиной d) выражение (8) соответствует известному предельному случаю

$$g(\tau) \approx 1 - \frac{\lambda}{d} \ln(\nu_0 \tau).$$

При $L \ll d$ (резко неоднородное распределение)

$$g(\tau) \approx (\nu_0 \tau)^{-\gamma} = A \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-\gamma}, \quad (9)$$

где τ_0 – постоянная размерности времени (с), A – параметр, не зависящий от времени. Параметр λ для барьера Si-SiO₂ составляет около 0.06 нм [1]. С другой стороны, характерный параметр L распределения дефектов по глубине не может быть меньше средней длины связи в структуре SiO₂, т.е., порядка 0.17 нм, а максимальное значение L практически не ограничено. Таким образом, можно ожидать, что значение γ будет гарантированно находиться в интервале 0...0,3. Как показывает численный анализ, в практически важном для рассматриваемой задачи диапазоне времен (100 нс ... 100 мс) общее выражение (8) может быть с приемлемой погрешностью (менее 5%) аппроксимировано зависимостью (9) с эффективными значениями параметров A и γ . Используя выражение (9), с учетом импульсного характера набора дозы получим выражение для кинетики накопления и релаксации заряда:

$$Q_s(t) \approx AD_1 \sum_{i=1}^n \left(\frac{t - (i-1)T}{\tau_0} \right)^{-\gamma} \Theta(t - (i-1)T). \quad (10)$$

Аналогичным образом (с $n=1$) будет описываться заряд, сохраняющийся в окисле к моменту t_0 после воздействия моделируемого одиночного импульса:

$$\Delta Q_0(t_0) = AD_0 \left(\frac{t_0}{\tau_0} \right)^{-\gamma}. \quad (11)$$

Консервативность оценки уровня стойкости по отношению к захваченному заряду может быть обеспечена при выполнении следующих условий:

1) суммарная доза, передаваемая за серию из n импульсов, превосходит заданную D_0 :

$$nD_1 \geq D_0; \quad (12)$$

2) суммарный заряд, захваченный в окисле после серии импульсов к моменту времени t_x , должен быть равен заряду, захваченному к моменту времени t_0 после предполагаемого воздействия одиночного импульса:

$$\Delta Q_n(t_x) = \Delta Q_0(t_0). \quad (13)$$

С учетом выражений (10-12) условие (13) запишется в виде:

$$\sum_{i=0}^{n-1} (t_x + iT)^{-\gamma} = \frac{D_0}{D_1} t_0^{-\gamma}. \quad (14)$$

Уравнение (14) по форме подобно соотношению (5), полученному выше при описании переноса подвижного заряда для предельных значений параметра $t_{1/2}$. Таким образом, условие консервативности оценки по отношению к процессам переноса и релаксации заряда может быть описано единым соотношением (4), в котором величины $t_{1/2}$ и α следует рассматривать как формальные параметры. В этом случае α агрегирует коэффициент дисперсионного переноса и параметр релаксации γ .

По данным [1], характерное время переноса 50% подвижного заряда $t_{1/2}$ может составлять $10^{-6} \dots 10^{-1}$ с, а коэффициент дисперсионного переноса α в зависимости от толщины окисла – 0.25...0.33. На практике значения параметров α , $t_{1/2}$ и γ для конкретного прибора неизвестны. Кроме того, как указывалось выше, каждый элементарный МОПТ в составе реальной паразитной структуры характеризуется индивидуальным набором значений параметров (времени $t_{1/2}$ и коэффициента A в выражении (2)). В этой связи представляется целесообразным выбирать режимы испытаний (число импульсов ускорителя N и время контроля t_x) таким образом, чтобы обеспечить выполнение условия (5), т.е., консервативность теста, при любых физически значимых значениях параметров $t_{1/2}$ и α . Для этого достаточно в качестве числа импульсов N выбрать максимальное значение величины n_m , определяемой соотношением (4):

$$N = \max(n_m(t_{1/2}, \alpha)). \quad (15)$$

В этом случае будет «автоматически» обеспечена консервативность оценки N в каждом элементарном МОПТ независимо от его геометрии и полевого ре-

жима. Поиск экстремального значения функции (15) может проводиться численным методом. Область поиска экстремума целесообразно при этом ограничить диапазоном $t_{1/2}=10^{-11} \dots 10^1$ с, $\alpha=0.001 \dots 0.35$. На рис. 2 показана характерная поверхность $n_m(t_{1/2}, \alpha)$, построенная путем численного решения неравенства (4) (при $t_x=t_m$).

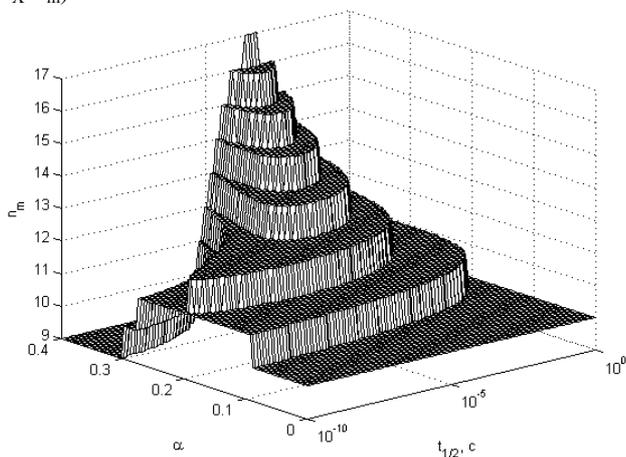


Рис. 2. Поверхность решений неравенства $n_m(t_{1/2}, \alpha)$ при $D_0/D_1=9$, $t_0=2$ мс, $T=5$ мс, $t_m=10$ мкс

Для найденного согласно (15) числа импульсов N необходимо определить время контроля работоспособности объекта испытаний t_x . Случай $t_x=t_m$, для которого осуществлялся поиск наибольшего значения n_m , может оказаться избыточно консервативным. Величина t_x должна определяться из соотношения (4) при условии равенства левой и правой частей:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{1 + \left(\frac{t_x + iT}{t_{1/2}}\right)^\alpha} = \frac{D_0}{D_1} \frac{1}{1 + \left(\frac{t_0}{t_{1/2}}\right)^\alpha}. \quad (16)$$

Уравнение (16) неявно определяет зависимость величины t_x от $t_{1/2}$ и α при заданном значении N . Для обеспечения консервативности оценки в качестве t_x целесообразно выбрать минимальное значение функции $t_x(t_{1/2}, \alpha)$:

$$t_x = \min t_x(t_{1/2}, \alpha).$$

Строго говоря, минимальное значение t_x следовало бы искать не во всей допустимой области $(t_{1/2}, \alpha)$, а лишь в подобласти, соответствующей найденному ранее максимальному значению N . Вместе с тем, для обеспечения консервативности представляется целесообразным использовать расширенный интервал значений параметров. На рис. 3 показана характерная поверхность $t_x(t_{1/2}, \alpha)$, являющаяся решением уравнения (16). Видно, что решение, удовлетворяющее условию $t_x > t_m$, может быть получено не при всех значениях параметров.

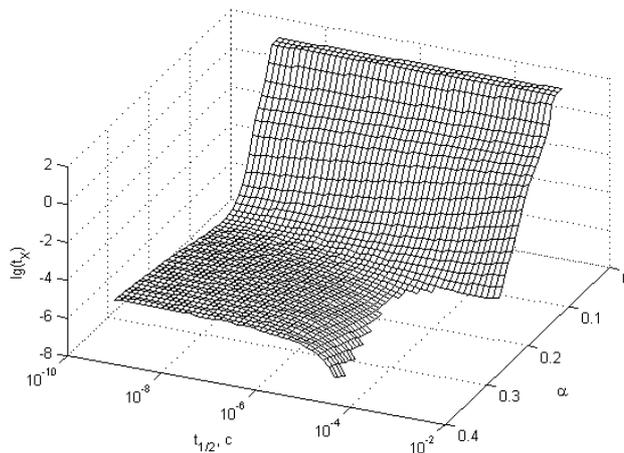


Рис. 3. Поверхность решений $t_x(t_{1/2}, \alpha)$ при $D_0/D_1=9$, $t_0=2$ мс, $T=5$ мс, $N=10$

Таким образом, консервативные режимы проведения испытаний (число импульсов ускорителя n и время контроля параметров СБИС t_x) могут быть определены исключительно на основании информации о параметрах моделирующей установки и требований, предъявляемых к объекту испытаний.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный подход позволяет обеспечить умеренную консервативность оценки работоспособности объекта испытаний в заданных условиях при реально достижимых параметрах моделирующих установок. Консервативность достигается по отношению к процессам переноса и релаксации заряда и в линейном приближении не зависит от полевого режима и топологии СБИС. При этом не требуется предварительной идентификации параметров моделей физических процессов. Следует подчеркнуть, что предлагаемый подход представляет собой теоретическую схему, которая нуждается в экспериментальной верификации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ionizing Radiation Effects in MOS devices and Circuits, ed. by T.P.Ma and P.V. Dressendorfer, J.Wiley & Sons, New York, 1989.
- [2] А.Ю.Никифоров, А.В.Согоян. Моделирование дозовых эффектов в паразитных МОП-структурах КМОП БИС при воздействии высокоинтенсивного импульсного ионизирующего излучения // Микроэлектроника. – 2004. – т. 33. – № 2. – С. 108.
- [3] Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. – М.: Радио и связь, 1994.