

02;06

Методика определения параметров радиационных дефектов и прогноза радиационной стойкости МОП-транзисторов

© М.Н. Левин, Е.В. Бондаренко, А.Е. Бормонтов,
А.В. Татаринцев, В.Р. Гитлин

Воронежский государственный университет
E-mail: levin@phys.vsu.ru

Поступило в Редакцию 26 февраля 2010 г.

Представлен анализ радиационной стойкости МОП-транзисторов, учитывающий как эффекты образования радиационно-индуцированного заряда в объеме окисла и на поверхностных состояниях, так и релаксационные процессы термической и туннельной разрядки накопленного заряда. Методика прогнозирования радиационной стойкости включает процедуру определения параметров радиационных дефектов из экспериментальной дозовой зависимости, полученной при большой мощности радиации, и температурно-временных зависимостей релаксации порогового напряжения. Установленные параметры позволяют предсказать поведение МОП-транзистора под воздействием излучения любой мощности, включая низкоинтенсивную радиацию.

Одним из направлений исследования воздействий ионизирующих излучений (ИИ) на структуру металл–окисел–полупроводник (МОП) является разработка методов прогноза радиационной стойкости МОП интегральных схем к воздействию низкоинтенсивного космического излучения.

Суть проблемы состоит в следующем. При воздействии ИИ на МОП-структуру происходит образование положительного радиационно-индуцированного заряда в окисле и поверхностных состояниях (ПС) на границе полупроводник–окисел. Наряду с этим протекают долговременные процессы туннельной и термической разрядки накопленного заряда. Соотношение этих процессов определяет изменение зарядового состояния МОП-структуры в процессе воздействия ИИ. При действии ИИ большой мощности дозы при низкой температуре

определяющим является накопление заряда и туннельная разрядка не вносит существенного вклада. При малой мощности дозы, что имеет место при воздействии низкоинтенсивного космического излучения, процессы накопления заряда и его туннельной разрядки становятся соизмеримыми.

Сложность решения проблемы обусловлена тем, что проведение натурных испытаний не представляется возможным из-за больших времен испытаний, соизмеримых со временем эксплуатации прибора. В связи с этим актуальной задачей является разработка методики прогноза радиационной стойкости МОП-транзисторов (МОПТ) к воздействию низкоинтенсивного ИИ, основанной на исследовании отклика прибора к воздействию излучения с большой мощностью дозы.

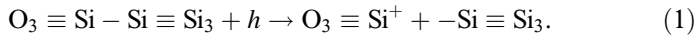
В настоящей работе рассмотрена модель МОП-структуры, учитывающая наличие дефектов в окисле и на его границе с полупроводником, представлены результаты моделирования процессов накопления заряда при воздействии ИИ, а также методика прогноза радиационной стойкости МОПТ к воздействию ИИ малой мощности дозы. Методика основана на анализе экспериментальных дозовых и температурно-временных зависимостей порогового напряжения, измеренных при большой мощности дозы радиации, и решении системы уравнений, описывающих радиационно-термические процессы под воздействием ИИ с любой мощностью дозы, включая малые мощности.

Исследование воздействия ИИ на МОПТ с высококачественными слоями двуокиси кремния, полученными „сухим“ окислением, показывают синхронное изменение зарядов в окисле и на ПС [1,2], что позволяет сделать вывод о едином механизме процессов радиационной генерации и отжига этих зарядов и выбрать для анализа воздействия ИИ следующую модель. В диэлектрике имеется два типа уровней радиационных дефектов: первый — глубокий энергетический уровень, соответствующий радиационно-индуцированным E' -центрам, равномерно распределенным по толщине диэлектрика; второй — ПС (P_b -центры), расположенные вблизи границы Si-SiO₂ (в слое толщиной 10 nm), дающие спектр уровней, равномерно распределенный по ширине запрещенной зоны полупроводника.

В процессе воздействия ИИ в диэлектрике МОП-структуры происходит генерация электронно-дырочных пар, разделение этих пар внешним полем, уход электронов из окисного слоя в электроды и захват дырок на ловушечные центры в диэлектрике с образованием

несущего положительный заряд E' -центра [3,4]. Процесс захвата дырок продолжается до компенсации внешнего поля электрическим полем накапливаемого объемного заряда и прекращения разделения электронно-дырочных пар в электрическом поле.

На границе Si–SiO₂ происходят реакции с образованием E' -центров и P_b -центров, например, следующего типа:



Заряд P_b -центров определяется величиной поверхностного потенциала.

Процессы туннельной и термической разрядки накопленного в диэлектрике заряда могут быть описаны выражениями [5]

$$P_t(x, t) = P(0, t) \exp(-\alpha \exp(-\beta x)t), \quad (2)$$

$$P_t(E_t, t) = P(E_t, 0) \exp(-AT^2 \exp(-E_t/kT)t), \quad (3)$$

где α и β — частотный и барьерный факторы соответственно ($\alpha \equiv \hbar/16m^*\sigma_p$; $\beta \equiv m^*\Delta E_t/2\hbar$; ΔE_t — высота барьера, m^* — эффективная масса электрона, \hbar — постоянная Планка); E_t — энергия дырочного центра, A — феноменологический параметр, который зависит от природы дырочного центра.

Численное моделирование процессов накопления радиационного заряда в структуре poly-Si–SiO₂–Si проводилось на основе системы уравнений, представленных в [6]. В расчетах принято, что энергия квантов рентгеновского излучения составляет 20 keV, экспозиционная доза до $5 \cdot 10^5$ R, толщина слоя SiO₂ $d = 100$ nm, концентрация легирующей примеси в полупроводнике $N_B = 10^{15}$ cm⁻³, материал затвора — легированный фосфором поликремний, подвижность электронов $\mu_n = 10^2$ cm² · V⁻¹ · s⁻¹, подвижность дырок $\mu_p = 0.6 \cdot 10^{-3}$ cm² · V⁻¹ · s⁻¹. Полевые зависимости сечений захвата для дырок $\sigma_p(E)$ и электронов $\sigma_n(E)$ учтены выражениями [5]

$$\sigma_p(E) = 1.4 \cdot \sigma_p^s (1.0 + 1.9 \cdot 10^{-4} E^{\sigma_p^f})^{-1}, \quad (4)$$

$$\sigma_n(E) = \sigma_n^s (1.0 + 10^{-4} E^{\sigma_n^f})^{-1}, \quad (5)$$

где $\sigma_{n,p}^{f,s}$ — варьируемые параметры, определяющие абсолютную величину и характер полевой зависимости сечений захвата.

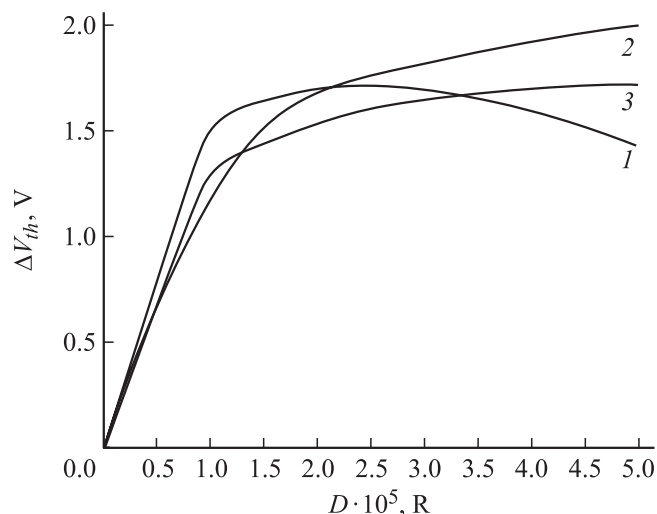


Рис. 1. Дозовые зависимости сдвига порогового напряжения ΔV_{th} при различных наборах параметров: 1 — $\sigma_p^f = 0.8$, $\sigma_n^f = 0.8$, $\sigma_n^s = 10^{-14}$, $N_{t1} = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_{t2} = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$; 2 — $\sigma_p^f = 1.0$, $\sigma_n^f = 1.2$, $\sigma_n^s = 10^{-14}$, $N_{t1} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_{t2} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; 3 — $\sigma_p^f = 0.8$, $\sigma_n^f = 0.8$, $\sigma_n^s = 5.0 \cdot 10^{-14}$, $N_{t1} = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_{t2} = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$; остальные параметры и условия набора дозы для всех кривых одинаковы.

Модель позволила провести анализ влияния параметров радиационных дефектов на характер изменения величины порогового напряжения ΔV_{th} и его составляющих ΔV_{0t} и ΔV_{it} , связанных с изменением радиационно-индуцированного заряда в окисле и на ПС соответственно. Анализировалось влияние сечений захвата для электронов и дырок $\sigma_{n,p}^{f,s}$, концентрации объемных и поверхностных ловушек $N_{t1,t2}$, их энергии активации. Установлено, что при изменении указанных параметров расчетные дозовые зависимости $\Delta V_{th}(D)$ имеют подобный вид только на начальных участках. С увеличением дозы характер этих зависимостей существенно различается (рис. 1). Наиболее существенное влияние на вид дозовой зависимости оказывают характер полевой зависимости сечения захвата для дырок и концентрации дефектов. Следовательно, прогнозировать характер изменения порогового напряжения МОПТ по виду его дозовой зависимости на начальном участке или по значению изменения порогового напряжения при каком-либо фиксированном

значении экспозиционной дозы не представляется возможным, если не известны параметры дефектов. Эти параметры могут быть определены варьированием их величин для наилучшего соответствия расчетной и экспериментальной дозовых зависимостей.

Энергии активации ловушек могут быть оценены из релаксационных зависимостей составляющей порогового напряжения ΔV_{0t} при температурах, при которых происходит отжиг заряда, захваченного на соответствующие уровни ловушек (параметры E_t и A в выражении (3)). Частотный и барьерный факторы α и β , определяющие туннельную разрядку ΔV_{0t} (см. (2)), а также эффективные параметры, определяющие долговременную разрядку ΔV_{it} , могут быть определены из релаксационных зависимостей при низкой температуре, когда термическая разрядка отсутствует.

Задача определения оставшихся параметров ловушек в окисном слое и на границе Si–SiO₂ сводится к подбору таких величин этих параметров, чтобы минимизировать отклонение расчетных дозовых зависимостей радиационного сдвига порогового напряжения ΔV_{th} и его составляющих ΔV_{0t} и ΔV_{it} от соответствующих экспериментальных зависимостей, измеренных в реальном времени при большой мощности дозы радиации. Для решения этой задачи разработана процедура, которая включает следующие этапы: выбор диапазонов значений варьируемых параметров, потенциально содержащих локальные минимумы; нахождение значений варьируемых параметров, при которых эти минимумы достигаются в каждом из диапазонов; определение оптимального набора варьируемых параметров.

На основе предложенной модели, используя дозовую зависимость при большой мощности дозы ($10^2 \text{ R} \cdot \text{s}^{-1}$) и кривые изотермической релаксации ΔV_{0t} и ΔV_{it} при температурах 300 и 750 К, были установлены следующие параметры радиационных дефектов: $\sigma_p^f = 1.0$; $\sigma_n^f = 0.8$; $\sigma_p^s = 1.4 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$; $\sigma_n^s = 10^{-14} \text{ cm}^{-2}$; $E_{t1} = 0.65 \text{ eV}$; $N_{t1} = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; $N_{t2} = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. С использованием этих параметров, в качестве примера, рассчитана дозовая зависимость сдвига порогового напряжения ΔV_{th} n -канального МОПТ (рис. 2, кривая 2) при малой мощности дозы ($10^{-1} \text{ R} \cdot \text{s}^{-1}$).

Существенно меньшие значения радиационного сдвига ΔV_{th} в случае малой мощности дозы радиации обусловлены тем, что становятся соизмеримы процессы образования радиационно-индуцированного заряда в диэлектрике вблизи границы и его туннельной разрядки. Уменьшение

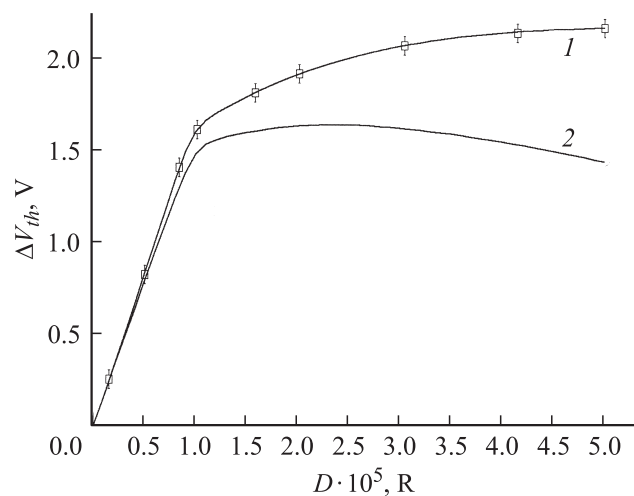


Рис. 2. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения ΔV_{th} n -канального МОПТ при различных мощностях доз: $10^2 \text{ R} \cdot \text{s}^{-1}$ (1) и $10^{-1} \text{ R} \cdot \text{s}^{-1}$ (2).

величины ΔV_{th} с ростом дозы радиации происходит за счет роста отрицательного заряда на ПС.

Таким образом, может быть предложена следующая методика прогноза изменения порогового напряжения МОПТ при воздействии ИИ малой мощности дозы:

1) из экспериментальной зависимости временной релаксации порогового напряжения при повышенной температуре ($T = 750 \text{ K}$), при которой вкладом туннельной разрядки можно пренебречь, определить параметры термической разрядки;

2) из экспериментальной зависимости релаксации порогового напряжения при низкой температуре ($T = 300 \text{ K}$), когда изменение напряжения происходит преимущественно за счет туннелирования, определить параметры туннельной разрядки;

3) из наилучшего совпадения экспериментальной и расчетной дозовых зависимостей изменения порогового напряжения при большой мощности дозы определить недостающие параметры ловушек в окисле;

4) рассчитать дозовую зависимость изменения порогового напряжения для необходимой мощности радиационной дозы.

Список литературы

- [1] *Кадменский А.Г., Кадменский С.Г., Левин М.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. № 3. С. 41–45.
- [2] *Levin M.N., Maslovsky V.M.* // Solid State Comm. 1994. V. 90. P. 813–816.
- [3] *Grove A.S., Snow E.H.* // Proc. IEEE. 1966. V. 54. P. 894–895.
- [4] *Stanley A.G.* // IEEE Trans. Electron Dev. 1967. V. 14. P. 134–138.
- [5] *McWhorter P.J., Miller S.L., Miller W.M.* // IEEE Trans. Nucl. Phys. 1990. V. 37. N 6. P. 1682–1689.
- [6] *Левин М.Н., Татаринцев А.В., Макаренко В.А., Гитлин В.Р.* // Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 5. С. 382–391.