

УДК 662.61.537.66.092

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ ДЕГРАДАЦИИ U_{OL} БИПОЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ В ПОЛЯХ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

С. В. Быткин¹

¹ПАО «Запорожсталь», ул. Южное шоссе, 72, 69008, Запорожье, Украина

E-mail: bytkin@birmir.net

Поступила в редакцию 16.03.2018

В работе анализируется распределение уровня сигнала «логический ноль» (U_{OL}) для выборки биполярных ИМС, изготовленных с применением радиационно-технологического процесса с использованием α -частиц от радиоизотопного источника и электронов с энергией $\cong 5$ МэВ при действии тестирующего γ - и электронного облучения. Показана возможность эффективного повышения радиационной стойкости ИМС, имеющих бимодальное распределение U_{OL} до облучения.

Ключевые слова: повышение радиационной стойкости ИМС, применение радиационно-технологического процесса

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ РАДІАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ (РТП) ДЛЯ УПОВІЛЬНЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ U_{OL} БИПОЛЯРНИХ ИНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ (ІМС) У ПОЛЯХ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

С. В. Биткін¹

¹ПАТ «Запоріжсталь», вул. Південне шосе, 72, 69008, Запоріжжя, Україна

В роботі аналізується розподіл рівня сигналу «логічний нуль» (U_{OL}) для вибірки биполярних ІМС, виготовлених із застосуванням радіаційно-технологічного процесу з використанням α -частинок від радіоізотопного джерела і електронів з енергією $\cong 5$ МеВ при дії γ - і електронного тестуючого опромінення. Доведена можливість ефективного підвищення радіаційної стійкості ІМС, що мають бимодальний розподіл U_{OL} до опромінення.

Ключові слова: підвищення радіаційної стійкості ІМС, застосування радіаційно-технологічного процесу

EXPERIMENTAL AND STATISTICAL MODELING OF THE APPLICATION OF RADIATION TECHNOLOGICAL PROCESSES (RTP) FOR DECELERATION OF BIPOLAR INTEGRAL CIRCUITS (IC) U_{OL} DEGRADATION IN THE FIELDS OF IONIZING RADIATIONS

Serhiy Bytkin¹

¹PJSC «Zaporizhstal», 72 South Highway Str., 69008, Zaporizhia, Ukraine

The work analyzes the distribution of the signal level “logical zero” (U_{OL}) for the sampling of bipolar ICs manufactured using the radiation-technological process based on using α -particles from a radioisotope source and electrons with an energy of $\cong 5$ MeV under the action of testing γ - and electron irradiation. The possibility of effectively increasing the radiation resistance of ICs having a bimodal U_{OL} distribution before irradiation was shown.

Keywords: increase of radiation resistance of IC, application of radiation-technological process

ORCID IDs

Serhiy Bytkin: <https://orcid.org/0000-0003-3583-3371>

ВВЕДЕНИЕ

Задача обеспечения радиационной стойкости [1, 2] актуальна не только для интегральных микросхем (ИМС) аэрокосмических систем,

© С. В. Быткин, 2018

чувствительных к воздействию протонов, но и для микроэлектроники наземного оборудования – с уменьшением топологических размеров активных элементов и повышением

плотности упаковки возрастает чувствительность микросхем к наземным высокоэнергетическим атмосферным нейтронам. Существует тенденция применения коммерческих ИМС в условиях действия ионизирующих излучений, несмотря на недостаточный уровень их надёжности (функциональные отказы) по суммарной накопленной дозе, их стойкость не контролируется от партии к партии, а надёжность в экстремальных условиях эксплуатации не определена. Основная причина: разработка и изготовление ИМС со специальными свойствами требует значительных затрат, вследствие чего $\cong 20\%$ полупроводниковых компаний прекратили производство стойких к радиации ИМС, выросли цены и сроки поставки специализированных изделий. Необходима разработка методов обеспечения низкой степени деградации электрофизических характеристик ИМС в условиях действия ионизирующего излучения, совместимых с типичной полупроводниковой технологией, например, различных форм радиационно-термической обработки пластин, на которых сформированы транзисторные структуры. Специфическая часть технологии цифровых биполярных ИС существенно улучшает их радиационную стойкость [3, 4]. Например, для повышения радиационной стойкости ИС могут быть предложены практические результаты разработки и сравнительного анализа радиационно-технологических процессов (РТП) для прп структур, представленные автором специалистам NASA на Military and Aerospace Applications of Programmable Devices and Technologies Conference (MAPLD 1999, 2000, 2001, 2004) в Johns Hopkins University – Applied Physics Laboratory, Laurel, Maryland, USA [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Физико-технологические аспекты радиационной технологии, использующей энергию пучка электронов $\cong 6 - 10$ МэВ для дискретных приборов изучены практически исчерпывающе [6]. Вместе с тем, для планарных мелких структур ИМС с глубиной залегания

$\leq 3..5$ мкм возможно применение изотопных источников высокоэнергетических α -частиц. Физические процессы в кремнии, протекающие при его облучении α -частицами описаны в обзоре [7] и полученные результаты подтверждают возможность легирования полупроводниковых материалов радиационными дефектами, а, следовательно, их технологическое применение. Используемая в этой работе технология включает процесс облучения пластин с ИМС потоком высокоэнергетических частиц, например, α -частиц с энергией $\approx 4,5$ МэВ после формирования прп транзисторов диффузией, но до осаждения металлизации. Для подтверждения принципиальной возможности использования РТП для повышения стабильности ИМС при действии облучения использованы изделия, изготовленные по технологии «кремний с диэлектрической изоляцией» (КСДИ) с целью практического исключения токов утечки планарных активных элементов на результаты измерений. Приборы изготовлены на пластинах CZn-Si с $\rho = 0.3$ Ом·см, концентрацией междоузельного кислорода $N_{O_i} = 7 \cdot 10^{17}$ см⁻³, углерода $C_s = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. После облучения проводится изотермический отжиг пластин для получения предусмотренных технической документацией значений h_{21E} выходных прп транзисторов ИМС для обеспечения $U_{OL} \leq 0,4$ В. Для выбора эффективных режимов РТП с точки зрения замедления деградации коэффициентов усиления транзисторов h_{21E} проводился полный факторный эксперимент 2^2 с использованием тестовых прп структур для прогнозирования влияния радиационно-термической обработки на деградацию h_{21E} , или, иными словами, вычислялось численное значение $Y = h_{21E}(\Phi) / h_{21E}(0)$, (Φ – доза облучения, к которому необходимо повысить устойчивость ИС, например, Φ_γ для γ -облученных прп структур). Для тестовых транзисторов, облученных технологически α -частицами и прошедших отжиг в соответствии с режимами, предусмотренными матрицей планирования эксперимента (обычно 250 – 350 °С) исследована деградация коэффициента усиления по току при $D_\gamma \approx$

10^7 Rad (источник ^{60}Co). Изменения Y рассчитываются с использованием экспериментальных данных при изменении условий проведения радиационно-технологического процесса: интегрального потока α -частиц (Φ_α , см^{-2}) и температуры изотермического отжига ($t_{\text{ann.}}$, $^\circ\text{C}$). Условие $Y = 1$ является признаком отсутствия изменения $h_{21E}(D_\gamma)$. Наиболее эффективным является применение $\Phi_\alpha \geq 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $t_{\text{ann.}} \leq 300$. Для ИМС, изготовленных с применением РТП, необходимо подтверждение возможности перехода от технологии повышения радиационной стойкости тестовых прн структур к статистически обоснованной технологии замедления деградации критериальных параметров цифровых ИМС, прежде всего наиболее чувствительного к радиации уровня «логический ноль», U_{OL} [8].

Выбор составляющих радиационной технологии ИМС, например, вида применяемого технологического облучения также далеко не тривиальная задача, требующая учёта вида воздействующего на изделие облучения в процессе его эксплуатации. Для оценки влияния типа технологического облучения (альфа-частицы или электроны) на радиационную стойкость ИМС, оцениваемую по деградации U_{OL} при облучении электронами с энергией ≈ 5 МэВ и γ -квантами, используем ранее полученные экспериментальные данные по распределению U_{OL} ТТЛ ИМС (рис. 1), изготовленных по технологии КСДИ.

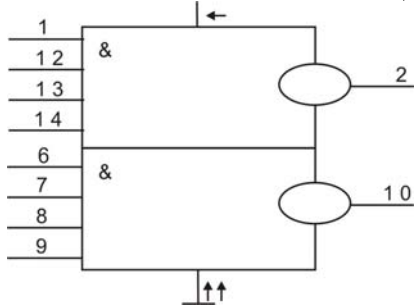
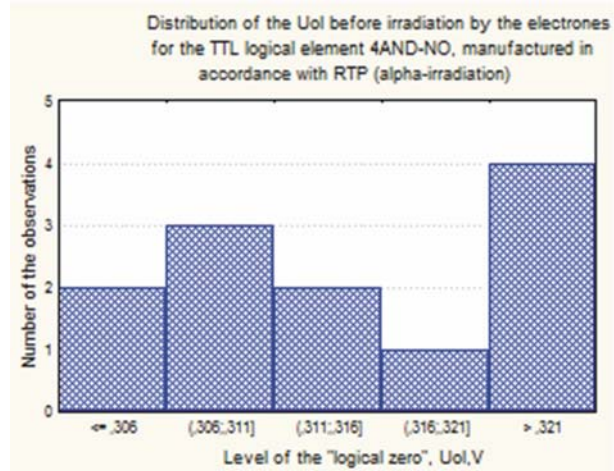


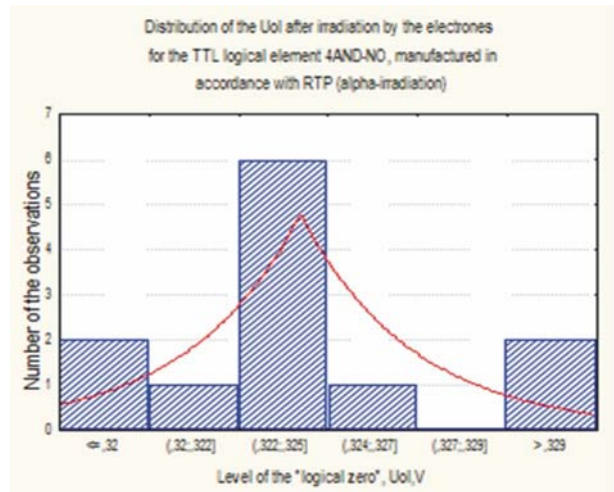
Рис. 1. Электрические режимы измерения U_{OL} для ИС 4И-НЕ: питание 4,5 В (вход 4); логические входы 1, 12, 13, 14 $U_{IH} = 2,4$ В; логические входы 6, 7, 8, 9 $U_{IL} = 0,4$ В; выходы 2, 10 $I_{OH} = 2,4$ мА, $I_{OL} = 45$ мА

Характеристики применённого РТП: $\Phi_\alpha \approx 8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, $t_{\text{ann.}} \approx 350$ $^\circ\text{C}$, время отжига $\tau \approx 20$ min, $\Phi_e \approx 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $t_{\text{ann.}} \approx 350$ $^\circ\text{C}$, $\tau \approx 90$ min. Режим далеко не оптимален с точки зрения достижения $Y = 1$, но позволяет не вносить

изменения в существующий технологический процесс диффузии. Результаты измерения U_{OL} (данные с 12 логических выходов) обрабатывались в среде STATISTICA, полученные функции распределения признака обрабатывались в среде MathCAD по стандартным технологиям этих программ. Например, гистограмма U_{OL} ИМС, изготовленных с применением α -облучения, до облучения ускоренными электронами, приведена на рис. 2, а), то же после облучения – на рис. 2, б) (распределение плотности вероятности предложены программой, до коррекции в режиме custom function):



а



б

Рис. 2. Экспериментальные данные по деградации U_{OL} для ИС, изготовленных с применением радиационной технологии с использованием технологического α -облучения после испытательного облучения ускоренными электронами с энергией ≈ 5 МэВ, $\Phi_e \approx 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

Аналогично проводилась обработка экспериментальных результатов для других вы-

борок ИС, стандартных и изготовленных с применением РТП на основе облучения ускоренными электронами. Наглядно радиационная стойкость ИС, изготовленных с применением различных технологий, проявляется в характере смещения распределений U_{OL} вправо (более высокие значения U_{OL} , т.е. изменение (деградация) критериального параметра). Нормальное распределение U_{OL} стандартных образцов до облучения электронами после облучения плавно переходит в экстремальное распределение (extreme value distribution) с образованием длинного правого «хвоста», создающего предпосылки для параметрического отказа изделия, что может указывать на монотонное накопление радиационных дефектов в при КСДИ структуре. Бимодальное распределение U_{OL} ИМС, изготовленных с применением α -РТП, становится «статистически более правильным» (распределение Лапласа после облучения), причём первый пик не наблюдается, а второй экстремум вправо смещается незначительно

и «хвост» распределения своей формы не меняет, рис. 3. Следует отметить, что для рассматриваемой выборки образцов, изготовленных с применением технологического α -облучения, принципиально важным является эффект, связанный с уменьшением U_{OL} (смещение распределений влево и переход от бимодального к логистическому распределению признака) при действии внешнего (не технологического) излучения. Фактически, внешнее воздействие расходует энергию на перестройку кристаллической структуры кремния, причём этот процесс тем эффективнее, чем более насыщена термическими и радиационными технологическими дефектами система планарных при структур, образующих ИМС. Уравнения (листинг 1 MathCAD), описывающие деградацию U_{OL} стандартных ИС и изготовленных по технологии КСДИ с применением РТП на основе α -облучения при облучении электронами с энергией 5 МэВ, $\Phi_e \cong 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ приведены ниже:

Распределение U_{ol} для выборки ИС, изготовленной по стандартной технологии, до облучения электронами:

$$\sigma_{10} := 0.004048 \quad a_{10} := 0.318$$

$$f_1(x) := 0.05 \cdot \frac{1}{\sigma_{10} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(x - a_{10})^2}{(2 \cdot \sigma_{10}^2)}\right] \quad P_1(x) := \frac{f_1(x)}{12}$$

Распределение U_{ol} для выборки ИС, изготовленной по стандартной технологии, после облучения электронами:

$$a_{22} := 0.329$$

$$b_{22} := 0.0073969$$

$$f_2(x) := 0.085 \cdot \frac{1}{b_{22}} \cdot e^{-\frac{x - a_{22}}{b_{22}}} \cdot e^{-e^{-\frac{x - a_{22}}{b_{22}}}} \quad P_2(x) := \frac{f_2(x)}{12}$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с альфа-облучением до облучения электронами:

$$a_{31} := 0.309$$

$$b_{31} := 0.005559$$

$$a_{32} := 0.3233333$$

$$\sigma_{32} := 0.002582$$

$$f_3(x) := 0.06 \cdot \frac{1}{b_{31}} \cdot e^{-\frac{x - a_{31}}{b_{31}}} \cdot e^{-e^{-\frac{x - a_{31}}{b_{31}}}} + 0.025 \cdot \frac{1}{\sigma_{32} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x - a_{32})^2}{(2 \cdot \sigma_{32}^2)}} \quad P_3(x) := \frac{f_3(x)}{12}$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с альфа-облучением после облучения электронами:

$$a_4 := 0.324$$

$$b_4 := 0.0025$$

$$f_4(x) := 0.015 \cdot \frac{1}{b_4} \cdot e^{-\frac{|x - a_4|}{b_4}} \quad P_4(x) := \frac{f_4(x)}{12}$$

Листинг 1. Организация вычислений в MathCAD вероятностей численных значений U_{OL} для ИМС, изготовленных с применением технологического α -облучения и испытательного облучения ускоренными электронами

Визуализация результатов обработки гистограмм приведена на рис. 3:

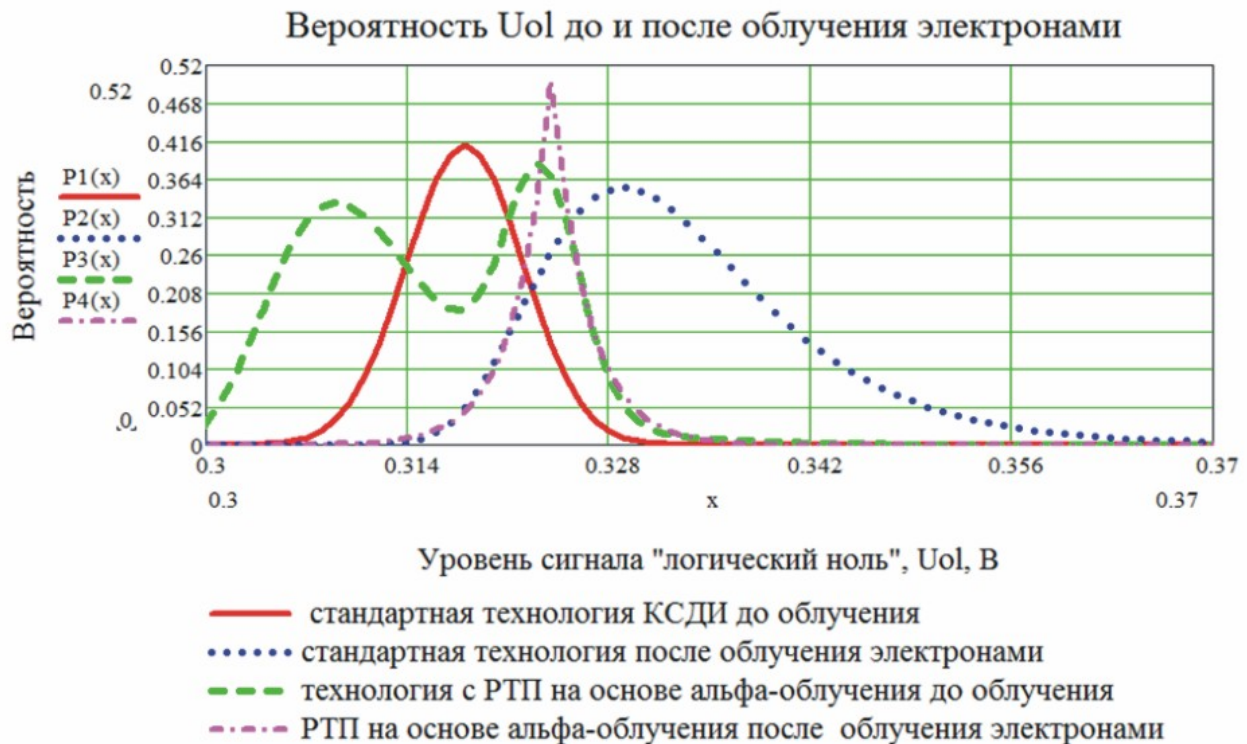


Рис. 3. Вероятность численного значения U_{OL} для ИС («кремний с диэлектрической изоляцией»), изготовленных с применением α -РТПП (технологическое α -облучение) и по стандартной технологии до и после облучения электронами с энергией 5МэВ, флюенс $\Phi_e \cong 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

Оценка повышения радиационной стойкости ИС, изготовленных с применением технологического α -облучения может быть проведена с использованием сравнения интегральной вероятности попадания численного значения U_{OL} в зону правого «хвоста» распределения, т.е. вероятности U_{OL} принять значение после облучения выше, чем наиболее вероятное (экстремум распределения) для изделий, изготовленных по стандартной технологии и исследуемой:

$$\frac{\int_{a22}^{\infty} P2(U_{OL})dU_{OL}}{\int_{a4}^{\infty} P4(U_{OL})dx} = 3,582 ,$$

где $a22$ и $a4$ – значения U_{OL} , соответствующие экстремумам соответствующих кривых.

Иными словами, для ИМС, изготовленной по стандартной технологии, интегральная

вероятность отклонения численного значения напряжения уровня «логического нуля» после облучения электронами с энергией 5МэВ не менее, чем в 3 раза выше, чем для ИМС, изготовленных с применением РТПП на основе технологического α -облучения. Высокая устойчивость таких ИМС к ионизирующему излучению может быть связана с процессами накопления кластеров вакансионно-газовых дефектов при облучении кремниевой структуры ионами He с энергией $\approx 4,5$ МэВ [9] и последующим их радиационным отжигом, т. е. перестройкой структуры кремния за счет освобождения запасенной в кристалле энергии при проведении РТПП [10].

Распределение U_{OL} для ИМС, изготовленных с применением электронного РТПП подчиняется распределению Вейбулла и плавно смещается вправо при облучении электронами (см. листинг 2).

Оценка повышения радиационной стойкости ИМС, изготовленных с применением технологического облучения электронами:

$$\frac{\int_{a22}^{\infty} P2(U_{OL}) dU_{OL}}{\int_{b7}^{\infty} P7(U_{OL}) dx} = 2,23 \cdot$$

Следовательно, эффективность альфа-РТП при облучении электронами практически в 1,6 раза выше, чем РТП с применением ускоренных электронов, которое, тем не менее, может быть использовано, например, при производстве дискретных силовых полупроводниковых приборов.

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с облучением электронами до облучения электронами:

$$c5 := 56.27918 \quad b5 := 0.3255284$$

$$f5(x) := \frac{0.064 \cdot c5}{b5} \cdot \left(\frac{x}{b5}\right)^{c5-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{b5}\right)^{c5}}$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с облучением электронами после облучения электронами:

$$c7 := 55.9 \quad b7 := 0.334$$

$$f7(x) := \frac{0.0655 \cdot c7}{b7} \cdot \left(\frac{x}{b7}\right)^{c7-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{b7}\right)^{c7}}$$

Листинг 2. Уравнения в MathCAD, описывающие деградацию U_{OL} ИМС, изготовленных с использованием технологического облучения электронами

Следовательно, использование технологического облучения электронами менее эффективно с точки зрения повышения радиационной стойкости ИМС (рис. 4):

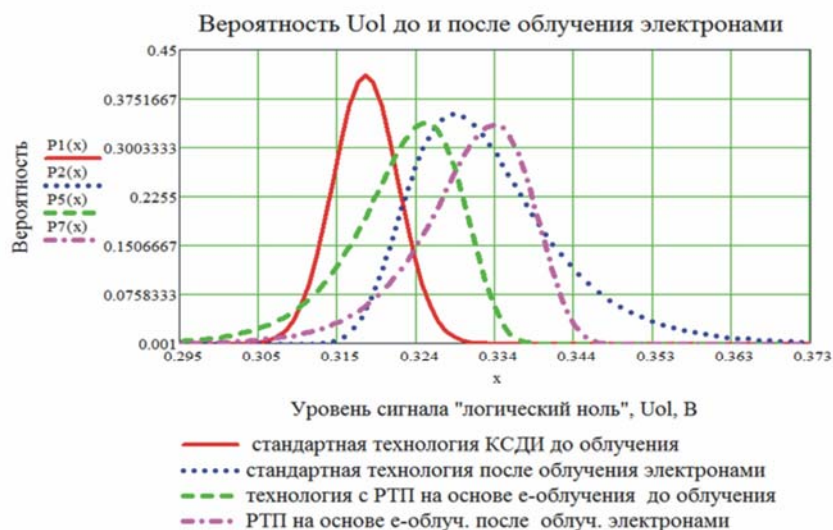


Рис. 4. Вероятность численного значения U_{OL} для ИС, изготовленных с применением РТП (технологическое облучение электронами) и по стандартной технологии «кремний с диэлектрической изоляцией» до и после облучения электронами с энергией 5 МэВ ($\Phi_e \cong 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$)

Сравним распределение U_{OL} для ИС, изготовленных по стандартной технологии и с применением α -РТП после облучения γ -квантами (листинг 3):

Распределение U_{OL} для выборки ИС, изготовленной по стандартной технологии, до облучения гамма-квантами:

$$b_{81} := 0.0015492 \quad b_{82} := 0.006036 \quad a_{81} := 0.3141 \quad a_{82} := 0.3261428$$

$$f_8(x) := 4.0 \cdot \frac{10^{-3}}{b_{81}} \cdot \exp\left(-\frac{|x - a_{81}|}{b_{81}}\right) + 3.65 \cdot \frac{10^{-2}}{b_{82}} \cdot \exp\left(-\frac{|x - a_{82}|}{b_{82}}\right)$$

Распределение U_{OL} для выборки ИС, изготовленной по стандартной технологии, после облучения гамма-квантами:

$$b_{92} := 0.004 \quad a_{92} := 0.320$$

$$f_9(x) := 9.2 \cdot \frac{10^{-2}}{b_{92}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{x - a_{92}}{b_{92}}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{x - a_{92}}{b_{92}}\right)\right)^2}$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с альфа-облучением до облучения гамма-квантами:

$$b_{101} := 0.0018974 \quad b_{102} := 0.003181 \quad a_{101} := 0.3088 \quad a_{102} := 0.3202857$$

$$f_{10}(x) := 6.6 \cdot \frac{10^{-3}}{b_{101}} \cdot \exp\left(-\frac{|x - a_{101}|}{b_{101}}\right) + 1.8 \cdot \frac{10^{-2}}{b_{102}} \cdot \exp\left(-\frac{|x - a_{102}|}{b_{102}}\right)$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с альфа-облучением после облучения гамма-квантами:

$$b_{112} := 0.003 \quad a_{112} := 0.319$$

$$f_{11}(x) := 6.39996 \cdot \frac{10^{-2}}{b_{112}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{x - a_{112}}{b_{112}}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{x - a_{112}}{b_{112}}\right)\right)^2}$$

Листинг 3. Уравнения в формате MathCAD, описывающие изменение распределения U_{OL} для стандартных ИМС и изготовленных с применением α -РТП после γ -облучения

Распределение вероятности U_{OL} для ИМС, изготовленных по стандартной технологии и с применением α -РТП до и после γ -облучения приведено на рис. 5.

Наблюдается существенное, двукратное улучшение качества ИС, изготовленных с применением α -РТП, выражающееся в уменьшении вероятности параметрического отказа ИС до облучения:

$$\frac{\int_{a_{82}}^{\infty} P_8(U_{OL}) dU_{OL}}{\int_{102}^{\infty} P_{10}(U_{OL}) dx} = 2,026 \cdot$$

Радиационная стойкость ИМС, изготовленных с применением α -РТП также существенно выше, чем у стандартных образцов:

$$\frac{\int_{0,32}^{\infty} P9(U_{OL}) dU_{OL}}{\int_{0,317}^{\infty} P11(U_{OL}) dx} = 1,438$$

Интересен эффект образования *статистически* стойких к действию ионизирующего облучения выборок ИМС, изготовленных по стандартной технологии. Выборка ИМС,

изготовленных по стандартной технологии, за счёт смещения выборки в сторону меньших значений U_{OL} и достижения «статистически более правильного» логистического распределения показывает более высокую радиационную стойкость, чем образцы, изготовленные с применением РТП на основе облучения электронами (листинг 4, рис. 6):



Рис. 5. Вероятность численного значения U_{OL} для ИС, изготовленных с применением α -РТП и по стандартной технологии «кремний с диэлектрической изоляцией» до и после облучения гамма-квантами

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с облучением электронами до облучения гамма-квантами:

$$c12 := 56.27918 \quad b12 := 0.3255284$$

$$f12(x) := \frac{0.094 \cdot c5}{b12} \cdot \left(\frac{x}{b12}\right)^{c12-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{b12}\right)^{c12}}$$

Распределение выборки ИС, изготовленной РТП с облучением электронами после облучения гамма-квантами:

$$a13 := 0.325 \quad b13 := 0.0055$$

$$f13(x) := 0.038 \cdot \frac{1}{b13} \cdot e^{-\frac{|x-a13|}{b13}}$$

Листинг 4. Влияние γ -облучения на изменение формы распределения U_{OL} ИМС, изготовленной с применением РТП на основе облучения электронами

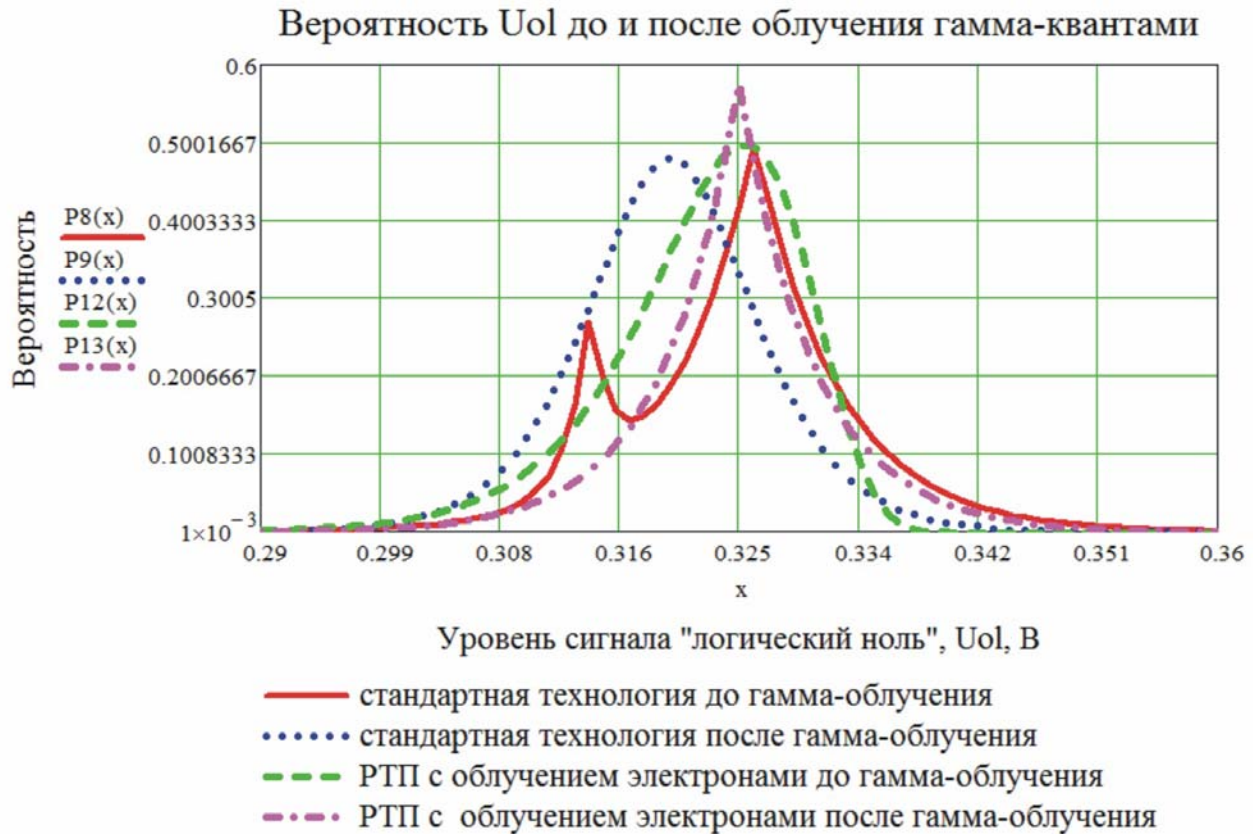


Рис. 6. Эффект образования «статистической» радиационной стойкости

«Статистически сложное» распределение U_{OL} для ИС, изготовленных по стандартной технологии оказывается более радиационно стойким, чем выборка ИС, изготовленных с применением РТП с электронным облучением: a₉₂=0,32В < a₁₃=0,325В, т.е. по критерию наиболее вероятного численного значения U_{OL} стандартная технология визуально (на ≈1,6%) более предпочтительна, чем РТП с технологическим облучением электронами.

$$\frac{\int_0^{\infty} \left(0.038 \cdot \frac{1}{b_{13}} \cdot e^{-\frac{|x-a_{13}|}{b_{13}}} \right) \cdot x \, dx}{\int_0^{\infty} \left[9.2 \cdot \frac{10^{-2}}{b_{92}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{x-a_{92}}{b_{92}}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{x-a_{92}}{b_{92}}\right)\right)^2} \right] \cdot x \, dx} = 0.839$$

Листинг 5. Расчетное подтверждение более высокой радиационной стойкости ИМС, изготовленной с применением электронного облучения при действии γ-облучения

Однако средневзвешенное значение U_{OL} для стандартных ИС после облучения выше (≈ 16 %), чем для изделий, изготовленных с применением этого вида РТП, имеющих более «узкое» лапласовское распределение.

Таким образом, радиационная стойкость ИС, изготовленных с применением РТП на основе облучения α-частицами, существенно выше, чем для образцов, изготовленных с применением РТП на основе облучения электронами. Радиационная стойкость выборки ИМС после облучения существенно зависит от распределения в ней U_{OL} до облучения, т.е., фактически, от степени совершенства исходного материала и его склонности образовывать термические центры рекомбинации в базе тестовых структур. Это особенно наглядно проявляется при сравнении результатов γ-облучения стандартных образцов ИС и изготовленных с применением РТП на основе электронного технологического облучения. Возможно, понятие «радиационная стойкость» в большей степени относится к выборке испытываемых ИМС, а не

к отдельному образцу изделия, характеристики которого могут находиться в разных точках распределения ИМС по U_{OL} до и после облучения.

ВЫВОДЫ

1. Использование радиационно-технологических процессов, как с применением технологического α -облучения, так и электронов с энергией $\cong 5$ МэВ позволяет в 2 – 3 раза улучшить радиационную стойкость цифровых биполярных ИМС даже при использовании режимов РТП, позволяющих не корректировать существующий технологический режим изготовления при структур, т. е. не оптимальных с расчетной точки зрения.

2. Форма распределения U_{OL} до облучения позволяет прогнозировать радиационную стойкость выборки ИМС, причем чем сложнее форма распределения, тем выше вероятность отсутствия возникновения длинных правых «хвостов» распределения U_{OL} и, следовательно, вероятности параметрического отказа ИМС после воздействия испытательного ионизирующего излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мироненко Л. Повышение радиационной стойкости интегральных схем. Конструктивные методы на базе промышленной технологии / Л. Мироненко, В. Юдинцев // *Электроника*. – 2012, № 8 (00122). – С. 74-87.
2. Полесский С. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании / С. Полесский, В. Жаднов, М. Артюхова, В. Прохоров // *Компоненты и технологии*. – 2010, № 9. – С. 93-98.
3. Bytkin S. V. Improvement of the radiation hardness of the digital bipolar IC with dielectric isolation. manufactured in accordance with the RTP technology / S. V. Bytkin // *Components fit for Space Seminar Proceedings*. Royal Military College of Science. Shrivenham. Swindon. UK. (17th February 1999). pp. 99-108.
4. Bytkin S. V. Comparison of the Radiation Hardness of the Dielectric Isolation ICs Made in Accordance With Different Types of the Preliminary Radiation & Thermal Processing / S. V. Bytkin // *2nd Military and Aerospace Applications of Programmable Devices and Technologies Conference (MAPLD 1999) Proceedings*. September 28-30. 1999. The Johns Hopkins University - Applied Physics Laboratory. Laurel. Maryland. USA.
http://klabs.org/richcontent/MAPLDCon99/Paper/s/P4_Bytkin_P.pdf
5. Быткин С. В. Конкурентная разведка конъюнктурно-технологических перспектив традиционного и high-tech экспорта Украины: монография / С. В. Быткин // *Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА*, 2017. – 276 с.
6. Лагов П. Б. Повышение импульсно-частотных, тепловых и инжекционных характеристик биполярных кремниевых структур методом радиационно-термической обработки. / П. Б. Лагов // *Дисс... доктора технич. наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах*. МИСиС, М.– 2017
7. Козлов В. А. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α -частицами. / В. А. Козлов, В. В. Козловский // *Обзор. Физика и техника полупроводников*. – 2001. – Т. 35, вып. 7. – С. 769-795.
8. Вологдин Э. Н. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах и методы испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость. Учебное пособие по дисциплине «Радиационная стойкость изделий электронной техники» // *Научно-образовательный центр Московского региона в области фундаментальных проблем радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения*. НОЦ – Московский государственный институт электроники и математики. Составители: Вологдин Э. Н., Лысенко А. П. М., 2002. – 46 с.
9. Starchyk M. I. Voids' layer structures in silicon irradiated with high doses of high-energy helium ions. *Semiconductor Physics*. / M. I. Starchyk, L. S. Marchenko, M. B. Pinkovska, G. G. Shmatko, V. I. Varnina // *Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2015. – Vol. 18. No. 3. – P. 292-296. doi: 10.15407/spqeo18.03.292
10. Чернов И. П. Упорядочение структуры кристаллов ионизирующим излучением (эффект малых доз ионизирующего излучения) / И. П. Чернов, А. П. Мамонтов // *Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ] / Томский политехнический университет (ТПУ)*. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – Т. 303, вып. 1. – С. 74-80.

REFERENCES

1. Mironenko L. Povysheniye radiatsionnoy stoykosti integralnykh skhem. Konstruktivnyye metody na baze promyshlennoy tekhnologii / L. Mironenko, V. Yudinsev // Elektronika. – 2012. № 8 (00122). – S. 74-87.
2. Poleskiy S. Obespecheniye radiatsionnoy stoykosti apparatury kosmicheskikh apparatov pri proyektirovanii / S. Poleskiy, V. Zhadnov, M. Artyukhova, V. Prokhorov // Komponenty i tekhnologii. – 2010. No. 9. – S. 93-98.
3. Bytkin S. V. Improvement of the radiation hardness of the digital bipolar IC with dielectric isolation. manufactured in accordance with the RTP technology / S. V. Bytkin // Components fit for Space Seminar Proceedings. Royal Military College of Science. Shrivenham. Swindon. UK. (17th February 1999). pp. 99-108.
4. Bytkin S. V. Comparison of the Radiation Hardness of the Dielectric Isolation ICs Made in Accordance With Different Types of the Preliminary Radiation & Thermal Processing / S. V. Bytkin // 2nd Military and Aerospace Applications of Programmable Devices and Technologies Conference (MAPLD 1999) Proceedings. September 28-30. 1999. The Johns Hopkins University - Applied Physics Laboratory. Laurel. Maryland. USA.
http://klabs.org/richcontent/MAPLDCon99/Papers/P4_Bytkin_P.pdf
5. Bytkin S. V. Konkurentnaya razvedka konyunktorno-tekhnologicheskikh perspektiv traditsionnogo i high-tech eksporta Ukrainy: monografiya / S.V. Bytkin // Zaporizh. derzh. inzh. akad. – Zaporizhzhya: ZDIA. 2017. – 276 s.
6. Lagov P. B. Povysheniye impulsno-chastotnykh. teplovykh i inzhektionsnykh kharakteristik bipolyarnykh kremniyevykh struktur metodom radiatsionno-termicheskoy obrabotki / P. B. Lagov // Diss... doktora tekhnich. nauk po spetsialnosti 05.27.01 – Tverdotelnaya elektronika. radioelektronnyye komponenty. mikro- i nanoelektronika. pribory na kvantovykh effektakh. MISiS. M.– 2017.
7. Kozlov V. A. Legirovaniye poluprovodnikov radiatsionnymi defektami pri obluchenii protonami i α -chastitsami / V. A. Kozlov, V. V. Kozlovskiy // Obzor. Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 2001. – Vol. 35. issue 7. – S. 769-795.
8. Vologdin E. N. Radiatsionnyye efekty v integralnykh mikroskhemakh i metody ispytaniy izdeliy poluprovodnikovoy elektroniki na radiatsionnuyu stoykost. Uchebnoye posobiye po distsipline «Radiatsionnaya stoykost izdeliy elektronnoy tekhniki». Nauchno-obrazovatelnyy tsentr Moskovskogo regiona v oblasti fundamentalnykh problem radiatsionnoy fiziki tverdogo tela i radiatsionnogo materialovedeniya. NOTs – Moskovskiy gosudarstvennyy institut elektroniki i matematiki. Sostaviteli: E. N. Vologdin, A. P. Lysenko. M., 2002. – 46 s.
9. Starchyk M. I. Voids' layer structures in silicon irradiated with high doses of high-energy helium ions. Semiconductor Physics. / M. I. Starchyk, L. S. Marchenko, M. B. Pinkovska, G. G. Shmatko, V. I. Varnina // Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2015. – Vol. 18. No. 3. – P. 292-296. doi: 10.15407/spqeo18.03.292
10. Chernov I. P. Uporyadocheniye struktury kristallov ioniziruyushchim izlucheniym (effekt malykh doz ioniziruyushchego izlucheniya) / I. P. Chernov. A. P. Mamontov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Izvestiya TPU] / Tomskiy politekhnicheskiiy universitet (TPU). – Tomsk: Izd-vo NTL. 2000. – T. 303. vyp. 1. – S. 74-80.