



Получено: 17.05.2023 г. | Принято: 26.05.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.298.305>

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАКОПЛЕННОГО ЗАРЯДА В МОП-ТРАНЗИСТОРЕ ОТ ЛИНЕЙНОЙ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

А.А.Глушко¹, к.т.н., зав. сектором, ORCID: 0000-0002-0516-3277

М.Р.Гусев¹, мл. науч. сотр., аспирант, ORCID: 0009-0004-4224-8386 / MichaelG@mail.ru

В.В.Макарчук¹, к.т.н., доц., ст. науч. сотр., ORCID: 0000-0002-0471-0785

Аннотация. Проведено приборно-технологическое моделирование МОП-транзистора, подвергнутого воздействию тяжелой заряженной частицы (ТЗЧ). Предложена и проверена гипотеза о линейной зависимости накопленного в приборе заряда от величины линейной потери энергии попадающей в него частицы. Определены наиболее чувствительные к радиационному воздействию области рассматриваемого транзистора.

Ключевые слова: технологическая САПР, КМОП-технология, тяжелые заряженные частицы, СБИС

Для цитирования: А.А. Глушко, М.Р. Гусев, В.В. Макарчук. Исследование зависимости накопленного заряда в моп-транзисторе от линейной потери энергии тяжелых заряженных частиц. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 5. С. 298–305. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.298.305>

Received: 17.05.2023 | Accepted: 26.05.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.298.305>

Original paper

RESEARCH OF THE DEPENDENCE OF THE COLLECTED CHARGE IN A MOS TRANSISTOR ON LINEAR ENERGY TRANSFER OF HEAVY IONS

A.A.Glushko¹, Cand. of Sci. (Tech), Head of Section, ORCID: 0000-0002-0516-3277

M.R.Gusev¹, Junior Researcher, Post-graduate, ORCID: 0009-0004-4224-8386 / MichaelG@mail.ru

V.V.Makarchuk¹, Cand. of Sci. (Tech), Docent, Senior Researcher, ORCID: 0000-0002-0471-0785

Abstract. A technological simulation of a MOS transistor exposed to a heavy ion has been carried out. A hypothesis about linear dependence of the collected charge in the device on the magnitude of linear energy transfer of a particle hitting it is proposed and tested. The most sensitive to radiation exposure areas of the considered transistor are determined.

Keywords: technological CAD, CMOS technology, heavy ions, VLSI

For citation: A.A. Glushko, M.R. Gusev, V.V. Makarchuk. Research of the dependence of the collected charge in a MOS transistor on linear energy transfer of heavy ions. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 5. PP. 298–305. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.298.305>.

¹ Федеральный научный центр "Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук", Москва, Россия / Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russia



ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на наличие немалого числа публикаций на тему устойчивости полупроводниковых приборов к радиационному воздействию, на сегодняшний день не сформирован универсальный методический и математический аппарат для проектирования интегральных схем с повышенной устойчивостью к радиационному воздействию [1-5]. В процессе разработки таких изделий учет воздействия ТЗЧ может производиться на разных уровнях [6]:

- при моделировании на уровне отдельных приборов в технологических САПР;
- при моделировании работы электрической схемы в схемотехнической САПР;
- на уровне регистровых передач при проектировании цифровых блоков с использованием современных симуляторов;
- на уровне системы посредством инъекции сбоев напрямую в память, что может быть использовано при разработке и отладке программ.

Нахождение аналитических зависимостей вероятности возникновения единичного сбоя от величины накопленного заряда при пролете ТЗЧ и величины линейной потери энергии (ЛПЭ) позволило бы создать компактные модели, которые могли бы использоваться при проектировании СБИС на уровне принципиальной электрической схемы. Такая гипотетическая компактная модель могла бы получать в качестве входных параметров не только размеры прибора, но и вероятность его сбоя, благодаря чему разработчик на этапе схемотехнического проектирования мог бы с большей точностью оценить работоспособность выбранного схемотехнического варианта и его пригодность к функционированию в условиях воздействия ТЗЧ.

Известно, что в космическую и наземную среду попадает множество частиц, созданных солнечной, космической или иной деятельностью. Это могут быть заряженные частицы (электроны, протоны или тяжелые заряженные частицы) или электромагнитное излучение. Особенно заметно влияние различного рода заряженных частиц сказывается на полупроводниковых приборах, входящих в состав аппаратуры, работающей в космическом пространстве. Такие изделия во время своей работы подвергаются как воздействию радиационных поясов Земли, так и потоков галактических частиц. При пролете заряженной частицы через объем кристалла кремния, она теряет свою энергию вследствие образования электрон-дырочных пар. Результатом такого взаимодействия

INTRODUCTION

Despite a large number of publications on the topic of radiation resistance of semiconductor devices, a universal methodical and mathematical apparatus for designing integrated circuits with enhanced resistance to radiation exposure has not been formed so far [1-5]. In the process of development of such products, taking into account the effect of heavy ions may be performed at different levels [6]:

- when modelling at device level in technology CAD process;
- when simulating the operation of an electrical circuit in a circuit engineering CAD system;
- at register transfer level by designing digital units using modern simulators;
- at system level by injecting faults directly into memory, which can be used in program development and debugging.

Finding analytical dependencies of probability of occurrence of a single failure on the value of collected charge during heavy ion transit and value of linear energy transfer (LET) would allow creating compact models that could be used in designing VLSI on the level of schematic circuit. Such a hypothetical compact model could receive as input parameters not only the device size, but also the failure probability, so that the designer at the stage of circuit design could more accurately assess performance of the selected circuit variant and its suitability for functioning under heavy ion impact.

It is known that many particles created by solar, space or other activities enter the space and terrestrial environment. These can be charged particles (electrons, protons or heavy ions) or electromagnetic radiation. Particularly noticeable effect of various kinds of charged particles affects semiconductor devices, which are part of equipment operating in outer space. Such devices are affected by both the Earth's radiation belts and galactic particle streams during their operation. When a charged particle flies through the volume of a crystal, it loses its energy through the electron-hole pairs generation. The result of such interaction is a current pulse, approximately described by the following expression [7]:

$$I(t) = I_0 (\exp(-t/\tau_F) - \exp(-t/\tau_R)), \quad (1)$$

where I_0 is the maximum value of current pulse; τ_R is the characteristic current rise time related to the time of carrier drift through the space charge region of the p-n junction; τ_F is the characteristic current fall time, t is the time.

The maximum value of collected charge Q_{coll} resulting from heavy ion can be approximated by the following expression:

является импульс тока, приближенно описываемый следующим выражением [7]:

$$I(t) = I_0 (\exp(-t/\tau_F) - \exp(-t/\tau_R)), \quad (1)$$

где I_0 – максимальное значение импульса тока; τ_R – характерное время нарастания тока, связанное со временем дрейфа носителей через область пространственного заряда р-п-перехода; τ_F – характерное время спада тока; t – время.

Максимальное значение накопленного заряда Q_{coll} в результате воздействия ТЗЧ приближенно может быть описано следующим выражением:

$$Q_{coll} = I_0(\tau_F - \tau_R). \quad (2)$$

Для более точного вычисления величины накопленного заряда следует использовать интеграл от импульса тока.

В свою очередь значение Q_{coll} определяет частоту сбоев SER [8], зависимость которой имеет вид:

$$SER = C \cdot \Phi \cdot A \cdot e^{-\frac{Q_{crit}}{Q_{coll}}}, \quad (3)$$

где C – константа, зависящая от технологического процесса; Φ – поток частиц; A – площадь схемы, чувствительная к воздействию; Q_{crit} – минимальный заряд, необходимый для возникновения сбоя (обычно определяется по результатам схемотехнического моделирования).

Определение величины накопленного заряда – важный шаг для моделирования работы схемы с учетом частоты возникновения сбоев.

Для создания упомянутой выше компактной модели в первую очередь большой интерес представляет поиск аналитической зависимости накопленного заряда от таких параметров, как энергия ТЗЧ и траектория ее полета. Об исследовании этой зависимости и пойдет речь ниже.

ОПИСАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование посвящено определению зависимости величины накопленного в объеме полупроводникового прибора заряда при пролете через него ТЗЧ от ЛПЭ. На первом этапе исследования считалось, что ТЗЧ пролетает через прибор строго вертикально, то есть угол ее встречи с поверхностью полупроводниковой структуры составляет 90° , а в качестве прибора рассматривалась структура транзистора, выполненного на подложке типа "кремний-на-изоляторе" (КНИ) по технологическому процессу с минимальной проектной нормой 0,35 мкм. В рассматриваемой

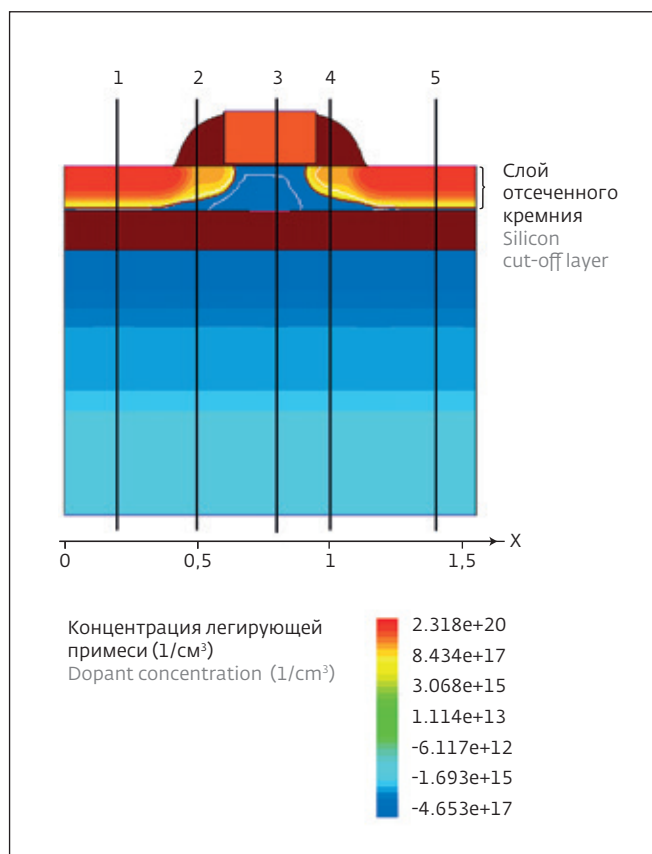


Рис.1. Конструкция транзистора с сечениями пяти функционально значащих областей

Fig.1. Transistor design with cross sections of the five functionally significant areas

$$Q_{coll} = I_0(\tau_F - \tau_R). \quad (2)$$

In order to calculate the accumulated charge value more accurately the integral of the current pulse should be used.

In turn, the value of Q_{coll} determines the SER failure rate [8], which can be expressed as follows:

$$SER = C \cdot \Phi \cdot A \cdot e^{-\frac{Q_{crit}}{Q_{coll}}}, \quad (3)$$

where C is a process-dependent constant; Φ is particle flux; A is the area of the circuit sensitive to impact; Q_{crit} is the minimum charge required to cause a failure (usually determined by circuit modelling).

Determining the collected charge value is an important step for modelling the circuit operation, taking into account the failure frequency.

In order to create the compact model mentioned above, it is primarily of great interest to find an



конструкции (в слое отсеченного кремния), представленной на рис.1, было выделено пять значащих областей прибора: сток (5), исток (1), тело (3), LDD-области истока и стока (2, 4).

Цель вычислительного эксперимента состояла в том, чтобы посредством приборно-технологического моделирования определить форму импульса тока в приборе и по ней рассчитать общий накопленный заряд. Проведение эксперимента для различных значений ЛПЭ-частицы, пролетающей через транзистор и вызывающей импульс тока, и расчет соответствующего этим значениям накопленного заряда был направлен на подтверждение гипотезы о характере пропорциональной зависимости величины накопленного заряда от значения ЛПЭ.

Для проведения описанных выше расчетов в системе приборно-технологического моделирования была использована модель ТЗЧ, в которой были использованы следующие параметры: момент времени проникновения ТЗЧ в объем транзистора (параметр Time); расстояние l , пройденное ТЗЧ в объеме полупроводникового материала (параметр Length); характеристическое расстояние $w_t(l)$, в общем случае являющееся функцией от расстояния l (параметр Wt_hi), а также величина ЛПЭ (параметр LET_f). На рис.2 схематично изображена траектория ТЗЧ, падающей под углом 90° к поверхности прибора.

На основе указанных выше исходных данных в модели производился расчет скорости генерации электрон-дырочных пар G согласно выражению:

$$G_{LET}(l, w, t) = G_{LET}(l)R(w, l)T(t), \quad (4)$$

где $G_{LET}(l)$ – функция, характеризующая потери энергии ТЗЧ; $T(t)$ – функция временного распределения скорости генерации; $R(w, l)$ – пространственное распределение скорости генерации.

При этом пространственное распределение скорости генерации $R(w, l)$ может быть вычислено как экспоненциальная или как Гауссова функция [9]. В данном вычислительном эксперименте была использована Гауссова функция.

Значения входных параметров базировались на расчетах, полученных в открыто распространяемой программе SRIM, которая в качестве входных параметров использует тип и энергию ТЗЧ (в диапазоне 10 эВ – 2 ГэВ), а также материал одного или нескольких слоев мишени. В качестве выходных данных, полученных в результате моделирования, было получено трехмерное распределение траекторий ТЗЧ в объеме твердого тела, а также такие их параметры, как глубина

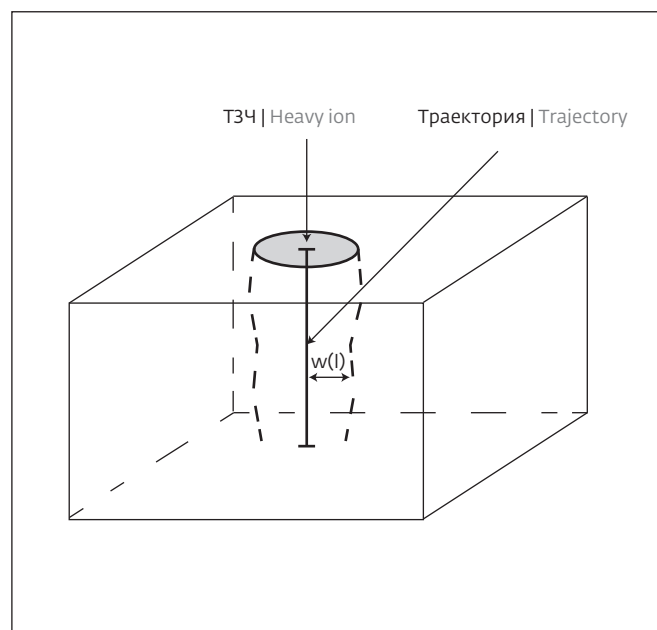


Рис.2. К модели пролета ТЗЧ через объем полупроводникового материала

Fig.2. Towards a model of heavy ion transit through the volume of semiconductor material

analytical relationship between the collected charge and parameters such as heavy ion energy and trajectory of its flight. The study of this dependence is discussed below.

DESCRIPTION OF THE COMPUTATIONAL EXPERIMENT

This study is devoted to determining the magnitude of charge accumulated in the volume of semiconductor device during heavy ion transit through it on LET. At the first stage of research it was considered that heavy ion transit through the device strictly vertically, that is, the angle of its meeting with the surface of the semiconductor structure is 90° , and the considered device was a transistor structure made on a silicon-on-insulator (SOI) substrate according to a technological process with a minimum feature size of 0.35 microns. In the considered structure (in the layer of cut-off silicon) presented in Fig.1 five significant regions of the device were distinguished: drain (5), source (1), body (3), LDD areas of source and drain (2, 4).

The aim of the computational experiment was to determine the shape of the current pulse in the device through instrumental simulation and use it to calculate the total collected charge. Conducting the experiment for different values of the LET of the particle passing through the transistor and causing the current pulse and calculating the collected charge corresponding to these values

Таблица 1. Параметры модели ТЗЧ

Table 1. Parameters of the heavy ion model

Параметр модели Model parameter	Время, с Time, s	Длина, мкм Length, μm	Wt, мкм Wt, μm
Значение Value	$2,0 \cdot 10^{-11}$	10	0,01

проникновения и рассеяние вдоль и поперек ионного пучка.

В качестве примеров были выбраны значения ЛПЭ – LET_f = [0,005 0,01 0,02 0,04 0,06 0,08 0,1 0,12 0,14 0,16 0,2 0,4] пКл/мкм. Остальные численные параметры модели ТЗЧ сведены в табл.1. В модели предполагалось, что характеристическое расстояние $w_t(l)$ является постоянным и слабо зависит от параметра l .

Расчет проводился для двухмерной приборно-технологической модели n-канального МОП-транзистора, электрофизические характеристики которого рассчитывались согласно уравнениям гидродинамической модели, что позволило более точно описать поведение прибора, по сравнению со стандартной диффузионно-дрейфовой моделью.

Прибор имел пять электрических контактов: сток, исток, затвор, подложка и тело. В начальный момент времени моделирования на всех контактах прибора присутствовало нулевое напряжение. Далее на стоке транзистора напряжение было увеличено до +3.3 В. Транзистор при этом оставался закрытым. Затем для транзистора в закрытом состоянии было выполнено моделирование события пролета ТЗЧ. В результате были получены временные зависимости тока стока, пример которых приведен на рис.3.

Для получения значения накопленного заряда при пролете ТЗЧ использовался скрипт на языке Tcl, с помощью которого был вычислен следующий интеграл:

$$Q_{\text{coll}} = \int_{t_1}^{t_2} I_{\text{drain}}(t) dt, \quad (5)$$

где $I_{\text{drain}}(t)$ – временная характеристика тока стока; t_1 – время начала нарастания тока стока; t_2 – время завершения спада тока стока в соответствии с рис.3.

В рамках описанного вычислительного эксперимента были рассчитаны все значения величины накопленного заряда при пролете ТЗЧ с ЛПЭ от 0,005 до 0,4 пКл/мкм вдоль всех пяти вертикальных сечений, показанных на рис.1.

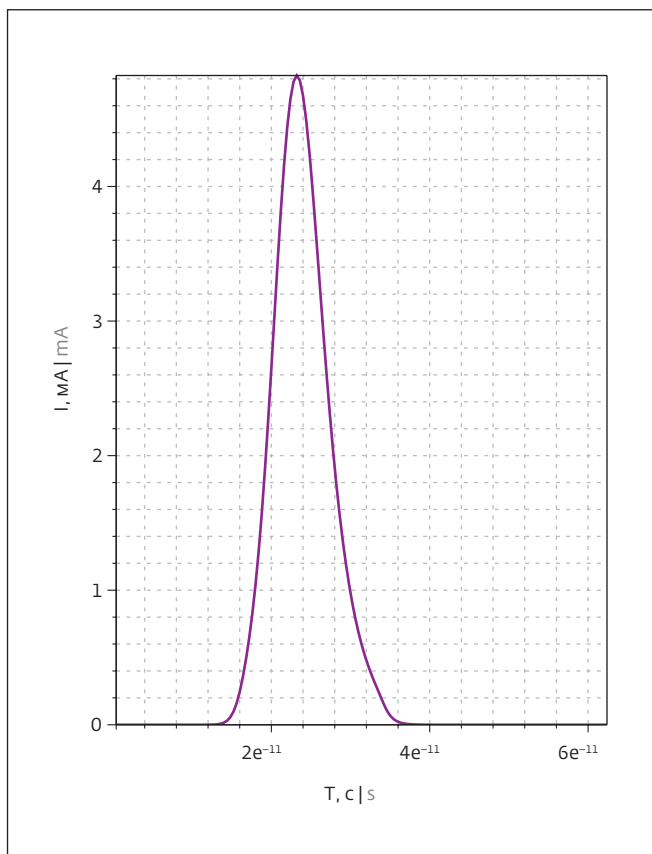


Рис.3. Временная зависимость тока стока при пролете ТЗЧ с ЛПЭ 0,4 пКл/мкм через канал транзистора (на примере сечения 3)

Fig.3. Time dependence of drain current during a heavy ion with 0.4 pC/um LET transit through a transistor channel (cross-section 3 as an example)

was aimed at confirming the hypothesis about the proportional character of the relationship between the value of the collected charge and the LET value.

For performing the above described calculations in the technology computer-aided design system we used the heavy ion model where the following parameters were used: time of heavy ion penetration into the transistor volume (Time parameter), distance l , covered by heavy ion in the volume of semiconductor material (Length parameter), characteristic distance $w_t(l)$, which is in general a function of distance l (Wt_{hi} parameter), and also LET value (LET_f parameter). Figure 2 shows schematically the trajectory of a heavy ion falling at an angle of 90° to the surface of the device.

Based on the above input data the generation rate of electron-hole pairs G was calculated in the model according to the expression:

$$G_{\text{LET}}(l, w, t) = G_{\text{LET}}(l)R(w, l)T(t), \quad (4)$$



Таблица 2. Вычисленные значения коэффициентов пропорциональности

Table 2. Calculated values for the proportionality factors

Область пролета ТЗЧ Heavy ion transit area	Значение коэффициента k Value of the k coefficient
Тело Body	100
LDD-область стока LDD drain area	171

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате проведения процесса моделирования был получен набор зависимостей накопленного заряда от ЛПЭ ТЗЧ. С целью выявления аналитической зависимости были отобраны события, обуславливающие наибольшее значение накопленного заряда, поскольку именно они с наибольшей вероятностью приводят к сбоям. Для этих случаев были получены графики, представленные на рис.4.

На всех представленных графиках отчетливо видна линейная зависимость накопленного заряда от ЛПЭ, что подтверждается показанными на графиках аппроксимирующими линиями, их уравнениями, а также коэффициентом достоверности аппроксимации, вычисленным с помощью электронных таблиц LibreOffice.

Учитывая тот факт, что значения свободных коэффициентов для полученных линейных зависимостей аппроксимирующих кривых

where $G_{LET}(l)$ is a function describing the heavy ion energy loss, $T(t)$ is a function of the temporal distribution of the generation rate, $R(w, l)$ is the spatial distribution of the generation rate.

The spatial distribution of the generation rate $R(w, l)$ can be calculated as an exponential or Gaussian function [9]. In this computational experiment the Gaussian function was used.

The input parameter values were based on calculations obtained in the openly distributed SRIM program, which uses as input parameters the type and energy of heavy ion (in the range of 10 eV-2 GeV), as well as the material of one or more layers of the target. As simulation outputs, a three-dimensional distribution of heavy ion trajectories in the solid volume, as well as their parameters such as penetration depth and scattering along and across the ion beam, have been obtained.

The $LET_f = [0.005 \ 0.01 \ 0.02 \ 0.04 \ 0.06 \ 0.08 \ 0.1 \ 0.12 \ 0.14 \ 0.16 \ 0.2 \ 0.4]$ pC/μm were chosen as examples. The remaining numerical parameters of the heavy ion model are summarised in Table 1. In this model it was assumed that the characteristic distance $w_t(l)$ is constant and weakly dependent on the l parameter.

The calculation was carried out for a two-dimensional technology model of an n-channel MOSFET, whose electrophysical characteristics were calculated according to the hydrodynamic model equations, which allowed a more accurate description of the device behaviour compared to the standard drift-diffusion model.

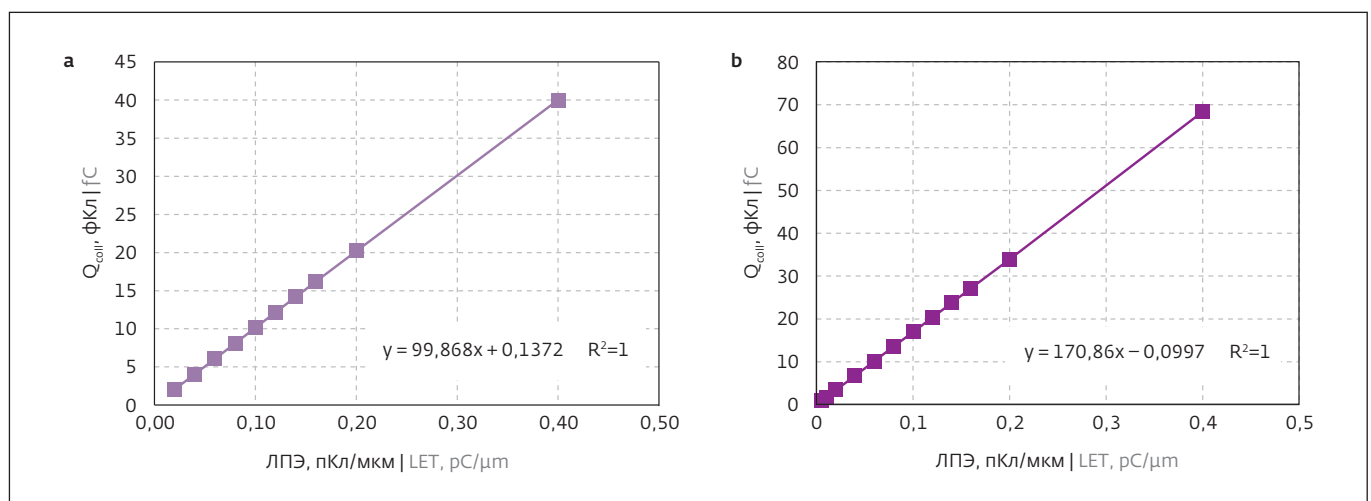


Рис.4. Зависимость накопленного в транзисторе заряда от ЛПЭ: а – при пролете ТЗЧ через область тела (сечение 3); б – при пролете ТЗЧ через LDD-область стока (сечение 4)

Fig.4. Dependence of the charge accumulated in the transistor on the LET: a – with heavy ion passing through the body area (section 3); b – with heavy ion passing through the LDD drain region (section 4)



на несколько порядков меньше угловых коэффициентов их линейных зависимостей, можно утверждать, что обсуждаемая зависимость имеет прямую пропорциональность. Тогда с достаточной степенью достоверности ее можно представить в следующем виде:

$$Q_{\text{coll}} = k \cdot \text{LET}, \quad (6)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Коэффициенты пропорциональности, полученные в проведенном вычислительном эксперименте, отличались для разных сечений прибора. Их значения сведены в табл.2.

Необходимо дополнительно отметить, что анализ полученных по итогам моделирования результатов позволил установить, что попадание ТЗЧ в LDD-область истока, а также в области контактов стока и истока (сечения 1, 2 и 5) практически не вызывает всплеска тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью оценки воздействия попадания в прибор ТЗЧ с разными значениями ЛПЭ проведено приборно-технологическое моделирование МОП-транзистора, изготовленного по КНИ-технологическому процессу с минимальной проектной нормой 0,35 мкм, в пяти выделенных областях. Анализ полученных результатов позволил подтвердить следующие гипотезы.

В транзисторной структуре можно отчетливо выделить наиболее чувствительные области, пролет ТЗЧ через которые вызывает в приборе накопление заряда большой величины, что, следовательно, означает большую вероятность сбоя. К таким областям относятся LDD-область стока и тело транзистора. При этом попадание ТЗЧ в области стока и истока практически не влияют на функционирование исследуемого прибора.

Зависимость накопленного заряда от величины ЛПЭ ТЗЧ приближенно имеет прямую пропорциональность. Действительно, частица, обладающая большей энергией, способствует генерации большего числа электрон-дырочных пар, вносящих вклад в величину накопленного заряда. Эффектов, замедляющих рост величины накопленного заряда при превышении определенного значения ЛПЭ, в данном вычислительном эксперименте выявлено не было.

Дальнейшая работа может включать постановку вычислительного эксперимента с попаданием ТЗЧ в МОП-транзистор под углом, что означало бы ее пролет сразу через несколько областей, а также дальнейшее обобщение аналитического описания поведения транзистора

The device had 5 electrical contacts: drain, source, gate, substrate and body. At the initial moment of the simulation zero voltage was present at all contacts of the device. Then the voltage at the transistor drain was increased to +3.3 V. The transistor remained off at this time. A simulation of the heavy ion transit event was then performed for the transistor in the closed state. As a result the time dependences of the drain current were obtained, an example of which is shown in Fig.3.

A Tcl script was used to obtain the collected charge value during the heavy ion transit by calculating the following integral:

$$Q_{\text{coll}} = \int_{t_1}^{t_2} I_{\text{drain}}(t) dt, \quad (5)$$

where $I_{\text{drain}}(t)$ is the time response of the drain current; t_1 is the start time of the drain current rise and t_2 is the end time of the drain current fall according to Fig.3.

In the framework of the described computational experiment, all the values of the accumulated charge during heavy ion transit from 0.005 to 0.4 pC/ μm were calculated along all 5 vertical sections shown in Fig.1.

RESULTS OF MODELLING

As a result of the simulation process, a set of dependencies of the collected charge on the LET of the heavy ion was obtained. In order to identify the analytical relationship, the events causing the highest value of collected charge were selected, as they are the ones most likely to cause failures. For these cases the graphs shown in Fig.4 were generated.

All of the presented graphs clearly show the linear dependence of the collected charge on the LET, which is confirmed by the approximation lines shown in the graphs, their equations as well as the approximation confidence factor calculated with the LibreOffice spreadsheet.

Considering the fact that the free coefficients values for the obtained linear dependences of approximating curves are several orders of magnitude smaller than the angular coefficients of their linear dependences, it can be stated that discussed dependence has a direct proportionality. Then, with a sufficient degree of certainty, it can be represented in the following form:

$$Q_{\text{coll}} = k \cdot \text{LET}, \quad (6)$$

where k is the proportionality factor.



в условиях радиационного воздействия с целью создания моделей, пригодных для использования при проведении схемотехнических расчетов.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Hazucha P., Svensson C.** Impact of CMOS technology scaling on the atmospheric neutron soft error rate // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. Vol. 47, no. 6. PP. 2586–2594.
2. **Baumann R.C.** Radiation-induced soft errors in advanced semiconductor technologies // *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. Vol. 5, no. 3. PP. 305–316.
3. **Anashin V.S., Koziukov A.E., Gorchichko M.E., Zemtsov K.S., Galimov A.M., Zebrev G.I.** Compact modeling of soft error rate in space environment, 2016 16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2016. PP. 1–5.
4. **Chatterjee I. et al.** Single-Event Charge Collection and Upset in 40-nm Dual- and Triple-Well Bulk CMOS SRAMs // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. Vol. 58, no. 6. PP. 2761–2767.
5. **Glushko A.A., Zinchenko L.A., Shakhnov V.A.** Simulation of the impact of heavy charged particles on the characteristics of field-effect silicon-on-insulator transistors // *Journal of communications technology and electronics*. 2015. T. 60, no. 10. PP. 1134–1140.
6. **Балбеков А.О., Горбунов М.С.** Методики моделирования воздействия ТЗЧ на ИС в маршруте проектирования // *Труды научно-исследовательского института Российской академии наук*. 2020. Т. 10, № 4. С. 4–13.
7. **Zebrev G.I., Gorbunov M.S., Shunkov V.E.** Physical Modeling and Circuit Simulation of Hardness of SOI Transistors and Circuits for Space Applications, RADECS Proceedings of RADECS-2006.
8. **Mukherjee S.** Architecture design for soft errors. Morgan Kaufmann; 1st edition (March 7, 2008). 360 p.
9. **Synopsys Sentaurus Device User Guide – Version H-2015.06**, June 2015. 1446 p.

The proportional coefficients obtained in the computational experiment were different for the different cross sections of the device. Their values are summarised in Table 2.

It should be additionally noted that the analysis of the simulation results showed that LET penetration into the LDD area of the source, as well as in the area of drain and source contacts (sections 1, 2 and 5) practically does not cause current surge.

CONCLUSIONS

In order to assess the impact of heavy ion with different LET values penetration into the device, a technological simulation of a MOSFET manufactured according to the SOI process with a minimum feature size of 0.35 μm in 5 selected areas was conducted. Analysis of obtained results allowed to confirm the following hypotheses:

In a transistor structure, the most sensitive areas can be clearly identified, where the heavy ion passing through causes a high charge build-up in the device, which therefore means a high probability of failure. These areas include the LDD drain region and the transistor body. At the same time, heavy ion penetration into the drain and source areas has practically no effect on the functioning of the device under investigation.

The dependence of the collected charge on the LET value of the heavy ion is approximated to have a direct proportionality. Indeed, the higher energy particle causes the generation of more electron-hole pairs which contribute to the value of the collected charge. No effects that slow down the growth of the collected charge value when a certain LET value is exceeded were found in this computational experiment.

Further work could include setting up a computational experiment with heavy ion hitting the MOSFET at an angle, which would mean flying through several regions at once, and further generalising the analytical description of transistor behaviour under radiation exposure to create models suitable for use in circuit calculations.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.