

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 621.382

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-86-94>

EDN KOATTE



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние встраивания поверхностных состояний на стойкость мощных металлооксидных полупроводниковых полевых транзисторов к электростатическому разряду

Д.М. Бакеренкова[®], А.С. Петров

АО «Научно-исследовательский институт приборов», Лыткарино, 140080 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: arzamasceva.diana@mail.ru

• Поступила: 16.05.2025 • Доработана: 24.06.2025 • Принята к опубликованию: 06.10.2025

Резюме

Цели. Целью исследования является проверка гипотезы о том, что стойкость мощных металлооксидных полупроводниковых полевых транзисторов (МОПТ) к электростатическому разряду (ЭСР) после гамма-облучения определяется концентрацией встроившихся в процессе облучения поверхностных состояний (ПС). Причиной такой зависимости является деградация коэффициента усиления паразитного биполярного транзистора в структуре мощных МОПТ при накоплении ПС. Как следствие, для включения паразитного биполярного транзистора и последующего выхода из строя МОПТ требуется все большее напряжение импульса ЭСР.

Методы. Теоретическое описание физического механизма накопления ПС и его влияния на стойкость мощных МОПТ к ЭСР. Экспериментальные исследования, включающие определение стойкости к ЭСР двух типов необлученных МОПТ с помощью специально разработанного генератора ЭСР, облучение гамма-квантами ⁶⁰Со в активном электрическом режиме до нескольких уровней поглощенной дозы и последующее определение стойкости облученных образцов к ЭСР.

Результаты. Разработан метод, позволяющий численно рассчитать зависимости тока стока от напряжения затвор-исток для любых значений плотности накопленного радиационно-индуцированного заряда и концентрации встроившихся ПС. Показано, что для 1-го типа МОПТ при облучении до уровня поглощенной дозы в 3 крад встраивание ПС не происходило, и также не наблюдалось изменение пробивного напряжения при воздействии ЭСР или наблюдалось его незначительное снижение. Для 2-го типа МОПТ наблюдалось встраивание ПС при облучении до уровня поглощенной дозы в 2 и 4 крад, а также увеличение пробивного напряжения при воздействии ЭСР.

Выводы. Показана связь между концентрацией встроившихся ПС и изменением стойкости мощных МОПТ к ЭСР. Полученные результаты могут быть использованы при оценке времени безотказной работы устройств, работающих в условиях одновременного воздействия радиационных и импульсных электрических нагрузок.

Ключевые слова: электростатический разряд, радиационные эффекты, поверхностные состояния, мощные МОП-транзисторы

Для цитирования: Бакеренкова Д.М., Петров А.С. Влияние встраивания поверхностных состояний на стойкость мощных металлооксидных полупроводниковых полевых транзисторов к электростатическому разряду. *Russian Technological Journal*. 2025;13(6):86–94. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-86-94>, <https://www.elibrary.ru/KOATTE>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Interface traps build-up and its influence on electrostatic discharge robustness of high-power metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

Diana M. Bakerenkova[@], Aleksandr S. Petrov

Research Institute of Scientific Instruments, Lytkarino, 140080 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: arzamasceva.diana@mail.ru

• Submitted: 16.05.2025 • Revised: 24.06.2025 • Accepted: 06.10.2025

Abstract

Objectives. The aim of the study is to confirm that the robustness of high-power metal–oxide–semiconductor field-effect transistor (MOSFET) to electrostatic discharge (ESD) after gamma irradiation is determined by the concentration of built-up interface traps (IT). The reason for such dependence is the degradation of the gain of the parasitic bipolar transistor in the structure of high-power MOSFETs during accumulation of IT. As a result, higher ESD pulse voltage is required to activate the parasitic bipolar transistor and cause the subsequent catastrophic failure of MOSFET.

Methods. The study describes the physical mechanism of the influence of IT accumulation on the robustness of high-power MOSFETs to ESD. Experimental studies included determination of ESD robustness for two types of high-power MOSFETs before irradiation, ⁶⁰Co gamma irradiation to several levels of total ionizing dose, and subsequent determination of the ESD robustness of irradiated samples.

Results. The study developed a method for calculating IT concentration and radiation-induced charge density from subthreshold drain-gate characteristics. It was also shown that for the first type of MOSFET, when irradiated to total ionizing dose level of 3 krad, the build-up IT did not occur, nor was any change or insignificant decrease in the breakdown voltage observed when exposed to ESD. For the second type of MOSFET, build-up IT was observed when irradiated to total ionizing dose level of 2 and 4 krad and an increase in the breakdown voltage was also observed when exposed to ESD.

Conclusions. The study shows the relationship between the IT concentration and the change in the breakdown voltage when exposed to ESD. The results obtained can be used to assess the failure-free operation time of devices operating under conditions of ionizing radiation and electrostatic discharges.

Keywords: electrostatic discharge, radiation effects, interface traps, high-power MOSFETs

For citation: Bakerenkova D.M., Petrov A.S. Interface traps build-up and its influence on electrostatic discharge robustness of high-power metal-oxide-semiconductor field-effect transistor. *Russian Technological Journal*. 2025;13(6):86–94. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-86-94>, <https://www.elibrary.ru/KOATTE>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

Глоссарий

Электростатический разряд (electrostatic discharge) – импульсный перенос электростатического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами.

Поглощенная доза (total ionizing dose) – величина энергии ионизирующего излучения, поглощенная веществом в единицу массы.

Дозовые эффекты (total ionizing dose effects) – эффекты, обусловленные потерей ионизирующим излучением в веществе энергии на ионизацию.

Вторичный пробой (secondary breakdown) – явление резкого спада напряжения коллектор-эмиттер, обусловленное развитием тепловой неустойчивости либо лавинной инжекцией.

Поверхностные состояния (interface traps) – энергетические состояния (уровни энергии) электронов проводимости, локализованные вблизи поверхности твердого тела.

Структурные эффекты (displacement damage) – эффекты, обусловленные потерей ионизирующим излучением в веществе энергии на создание структурных повреждений.

Область пространственного заряда (space charge region) – электрически заряженный слой, который образуется на границе *n*- и *p*-областей.

Радиационно-индуцированный заряд (radiation-induced charge) – положительный заряд, который накапливается в подзатворном диэлектрике транзисторов под действием ионизирующего излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования влияния радиационных нагрузок на пробивное напряжение *p-n*-переходов активно возобновились сравнительно недавно [1–3], поскольку ранее не наблюдалось критического изменения пробивного напряжения *p-n*-переходов после радиационного воздействия до уровня поглощенной дозы в $4 \cdot 10^4$ рад(Si) [4, 5]. Однако воздействие электростатических разрядов (ЭСР) и последующий пробой *p-n*-переходов проявляются более сложным механизмом, чем пробой при подаче статического или линейно нарастающего напряжения.

Одна из первых работ по этой теме была опубликована в 2017 г. [6] и посвящена влиянию дозовых эффектов на устройства защиты от ЭСР: *p+*/*nw*-диоды, диоды Зенера, *n*-МОП¹-транзисторы с заземленным затвором (gate grounded *n*-type metal-oxide-semiconductor, GGNMOS). В качестве источника ионизирующего излучения были выбраны ионы гелия с энергией 1.5 МэВ, образцы подвергались воздействию ионов со значением флюенса 10^{14} , $2 \cdot 10^{14}$ и 10^{15} см⁻². В обоих типах диодов наблюдалось некоторое увеличение напряжения срабатывания, а также рост тока утечки и снижение тока отката с ростом поглощенной дозы. Для GGNMOS после облучения исчезало поведение, характерное для вторичного пробоя, и также наблюдалось снижение тока отката. Однако в работе не было приведено объяснений и причин такого поведения приборов после облучения. Также возникает вопрос о влиянии структурных дефектов на поведение образцов во время импульса ЭСР, поскольку облучение ионами гелия

вносит значительное количество дефектов в объеме полупроводника.

В [7] исследовалось влияние гамма-облучения до поглощенной дозы 200 крад на характеристики низковольтных и высоковольтных двунаправленных кремниевых управляемых выпрямителей (dual-directional silicon controlled rectifier, DDSCR). В отличие от напряжения срабатывания низковольтных DDSCR, напряжение срабатывания высоковольтных DDSCR значительно увеличивалось с ростом поглощенной дозы в основном из-за увеличения напряжения пробоя, и такие выпрямители выходили из строя сразу после срабатывания. Увеличение пробивного напряжения после облучения было связано с накоплением ловушек и поверхностных состояний (ПС) в полевом и подзатворном оксидах, что приводило к увеличению области пространственного заряда (ОПЗ) *p-n*-переходов, которая и определяет напряжение пробоя. По той же причине после облучения возрастали токи утечки, что приводило к слабой инверсии паразитных боковых транзисторов. В данной работе были высказаны предположения о связи изменения поведения во время импульса ЭСР облученных устройств с накоплением ловушек и ПС, но не было проведено количественное сравнение концентрации накопленных ПС и изменения параметров устройств.

Целью текущей работы является выявление механизма изменения стойкости к ЭСР мощных металлооксидных полупроводниковых полевых транзисторов (МОПТ) после гамма-облучения, а также исследование связи между концентрацией встроившихся в процессе облучения ПС и изменением пробивного напряжения при воздействии ЭСР (V_{ESD}). Для расчета концентрации ПС необходимо

¹ Металл-оксид-полупроводник.

разработать метод, позволяющий напрямую связать вольтамперную характеристику (ВАХ) транзистора с концентрацией ПС.

1. ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ НАКОПЛЕНИЯ ПС И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА СТОЙКОСТЬ МОПТ К ЭСР

Ранее авторами в работе [8] было экспериментально показано, что облучение гамма-квантами мощных МОПТ приводит к улучшению стойкости к ЭСР, причем, чем больше поглощенная доза, тем выше пробивное напряжение. Такой эффект был связан с включением под действием ЭСР «паразитного» биполярного транзистора в структуре мощных МОПТ. Однако под действием гамма-облучения происходит деградация коэффициента усиления паразитного биполярного транзистора (h_{21e}) [9] и требуется все большее напряжение ЭСР для достижения током коллектора значения, необходимого для начала вторичного пробоя биполярного транзистора, и последующего выхода из строя МОПТ. Деградация h_{21e} вследствие воздействия ионизирующего излучения происходит из-за роста темпа рекомбинации в ОПЗ перехода эмиттер-база и проявляется в виде роста тока базы при фиксированном смещении эмиттера. Темп рекомбинации увеличивается из-за двух взаимосвязанных эффектов: увеличения скорости поверхностной рекомбинации и расширения ОПЗ перехода эмиттер-база [10]. Увеличение скорости поверхностной рекомбинации пропорционально плотности центров рекомбинации на границе Si/SiO₂ перехода эмиттер-база. Поверхностные состояния, будучи одними из центров рекомбинации, определяют это увеличение скорости, однако следует принимать во внимание и накопленный на границе Si/SiO₂ радиационно-индуцированный положительный заряд, вследствие сложного механизма их взаимодействия. Поверхностные состояния физически представляют собой атом Si с непасивированной оборванной связью, который образовался после разрыва связи Si-H [11].

На сегодняшний день считается, что доминирующим процессом в механизме накопления ПС является прыжковый перенос протонов. На 1-й стадии этого процесса радиационно-индуцированные дырки, образовавшиеся вследствие генерации электрон-дырочных пар ионизирующим излучением, перемещаются через оксид и свободный водород в форме протонов под действием электрического поля. На 2-й стадии протоны перемещаются уже посредством прыжкового переноса, и в момент достижения границы Si/SiO₂ они вступают в реакцию с разрывом связи Si-H, образуя H₂ и трехвалентный дефект Si [12, 13].

Существующие на сегодняшний день методы измерения коэффициента усиления

паразитного биполярного транзистора, применимые для мощных МОПТ с закороченным выводом подложки, подразумевают нагрев исследуемых образцов с 25 до 300°C и измерение зависимости тока стока от напряжения на стоке закрытого транзистора [14]. Такой нагрев после облучения меняет динамику накопления ПС [15, 16], следовательно, h_{21e} меняется в процессе измерения, и применение этих методов в текущем случае приведет к недостоверным результатам. Для подтверждения гипотезы о том, что стойкость мощных МОПТ к ЭСР после гамма-облучения определяется накоплением ПС, необходимо рассчитать плотность ПС необлученных образцов, облучить образцы до нескольких значений поглощенной дозы, затем рассчитать плотность ПС после облучения и исследовать стойкость к ЭСР в каждом случае.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве исследуемых образцов были выбраны два типа мощных МОПТ, изготовленных по технологии HEXFET (hexagonal field-effect transistor), т.е. в одном кристалле размещаются тысячи параллельно-включенных МОПТ-ячеек, образующих шестиугольник: IRFR4615PbF (производство International Rectifier, США) и IRFR3710ZPbF (производство Infineon Technologies, Германия). До и после облучения снимались сток-затворные ВАХ в подпороговой области ($V_{g,s} < V_{th}$), из которых рассчитывалась концентрация ПС.

Облучение гамма-квантами ⁶⁰Co происходило в режиме измерения порогового напряжения: $V_{g,s} = V_{d,s}$ и $I_d = 100$ мкА для IRFR4615PbF и $V_{g,s} = V_{d,s}$ и $I_d = 250$ мкА для IRFR3710ZPbF. Образцы IRFR4615PbF облучались до двух значений поглощенной дозы: 1.78 крад и 3.18 крад, образцы IRFR3710ZPbF облучались до значений поглощенной дозы: 2 крад и 3.9 крад. В качестве источника ЭСР использовался разработанный в АО «НИИП» (Россия)² генератор ЭСР, принципиальная схема которого приведена на рис. 1, а основные параметры – в табл. 1.

Стойкость образцов мощных МОПТ к ЭСР определялась путем измерения сток-затворной ВАХ транзистора после подачи импульса ЭСР на сток (исток и затвор в момент подачи импульса заземлены). Критерием отказа считалось нетипичное для МОПТ поведение ВАХ. Диапазон напряжений подаваемого импульса ЭСР составлял 1–5 кВ. Если образец выдерживал испытание одним импульсом ЭСР начальной амплитуды, в следующем подаваемом импульсе амплитуда увеличивалась на 0.5 кВ. Максимально выдерживаемое напряжение при

² <http://www.niipribor.ru/> (in Russ.). Дата обращения 06.10.2025. / Accessed October 06, 2025.

подаче импульса ЭСР (значение пробивного напряжения при воздействии ЭСР) определялось как значение напряжения в том импульсе, после которого появилось нетипичное для МОПТ поведение ВАХ.

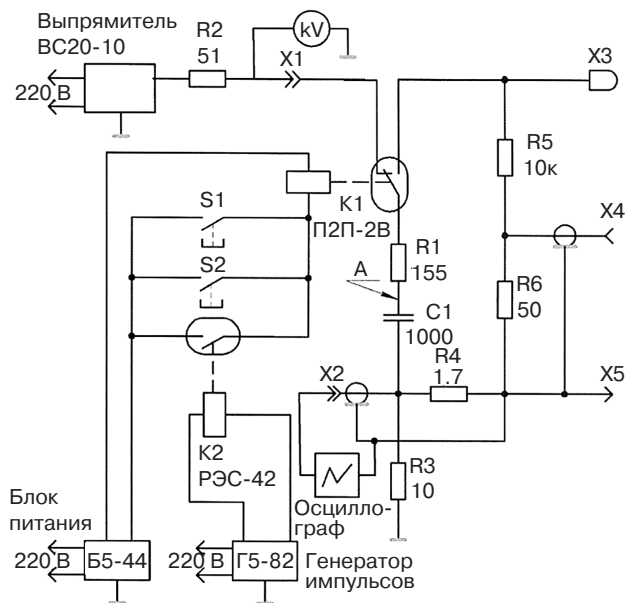


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема генератора ЭСР³. S1 – кнопка «Пуск» на генераторе, S2 – кнопка дистанционного управления пуском генератора, K1 – вакуумное реле П2Д-2В, K2 – промежуточное реле РЭС-42, X1 – подключение высоковольтного источника питания, X2 – разъем для измерения тока, X3 – разрядный наконечник, X4 – разъем для измерения напряжения, X5 – обратный токопровод, C1 – разрядный конденсатор, R1 – разрядный резистор, R2–R5 – резисторы, Б5-44 – блок питания, Г5-82 – генератор импульсов. Обозначения элементов схем соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81⁴

Таблица 1. Основные параметры генератора ЭСР

Параметр	Значение
Выходное (испытательное) плавно регулируемое напряжение, кВ	От 1 до 20 ± 2
Полярность выходного напряжения	Положительная
Частота последовательных импульсов, разрядов в секунду	До 10
Пиковое значение тока разрядного импульса, А	До 100 ± 10
Длительность фронта импульса тока на уровне 0.1–0.9 амплитуды, с	От 1 · 10 ⁻⁹ до 1 · 10 ⁻⁷
Запасаемая энергия в накопительном конденсаторе С1, МДж	До 200 ± 10

³ На рис. 1 приведена схема из паспорта генератора ЭСР. [Figure 1 shows a diagram from the ESD generator passport.]

⁴ ГОСТ 2.710-81. Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Interstate Standard. Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams. Moscow: Izd. Standartov; 1985 (in Russ.).]

3. МЕТОД РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ПС ИЗ ПОДПороГОВЫХ СТОК-ЗАТВОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Подпороговая ВАХ – это сток-затворная ВАХ в области слабой инверсии. Поверхностный потенциал в этом случае находится в диапазоне $\phi_b \leq \phi_s \leq 2\phi_b$, где

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right), \quad (1)$$

где q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; N_a и n_i – концентрация легирующей примеси и собственная концентрация в подложке, соответственно.

В таком случае зависимость тока стока от поверхностного потенциала описывается следующим образом [17]:

$$I_d = \frac{qDiWn_1^2}{\sqrt{2}L_{ch}N_a} \sqrt{\frac{\epsilon_{Si}\epsilon_0\phi_T}{qN_a}} \left(\frac{\phi_s}{\phi_T} \right)^{-1/2} \exp \left(\frac{\phi_s}{\phi_T} \right), \quad (2)$$

где Di – коэффициент диффузии, L_{ch} – длина канала, W – ширина канала, ϵ_{Si} – диэлектрическая проницаемость кремния, ϵ_0 – электрическая постоянная, $\phi_T = kT/q$.

Если исток соединен с подложкой и заземлен, то, построив зонную диаграмму (рис. 2), легко увидеть, что напряжение $V_{g,s}$ можно выразить как сумму падения напряжения на окисле ϕ_{ox} , падения напряжения в кремнии и контактной разности потенциалов:

$$V_{g,s} = \phi_s + \phi_{ox} + \left[\frac{1}{q} \left(\chi_{Si} + \frac{E_g}{2} \right) + \phi_b - \Phi_{me} \right], \quad (3)$$

где χ_{Si} – сродство к электрону в кремнии, E_g – ширина запрещенной зоны и Φ_{me} – работа выхода из металла.

Падение напряжения в окисле можно оценить, зная распределение радиационно-индуцированного положительного заряда в окисле ρ_{ox} и электрического поля E_{ox} вблизи границы Si/SiO₂:

$$\phi_{ox} = -E_{ox}d_{ox} - \frac{1}{\epsilon_{ox}\epsilon_0} \int_0^{d_{ox}} (d_{ox} - x)\rho_{ox}(x)dx, \quad (4)$$

где d_{ox} – толщина окисла, ϵ_{ox} – диэлектрическая проницаемость SiO₂, x – переменная интегрирования.

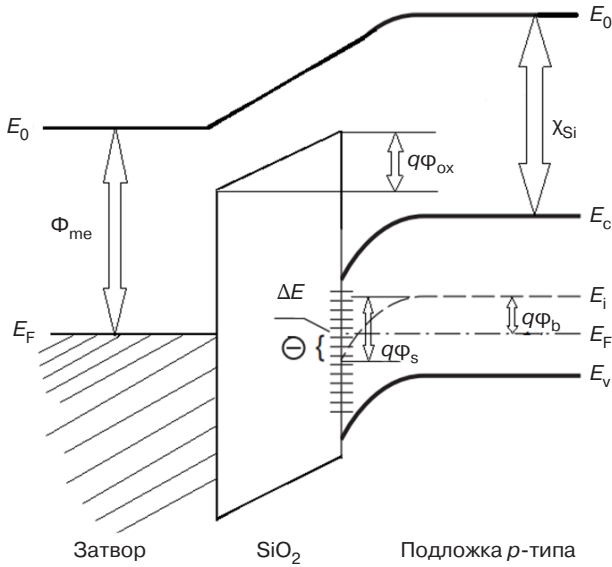


Рис. 2. Зонная диаграмма МОП-структуры с подложкой p -типа: E_0 – уровень вакуума; E_F – уровень Ферми; E_V – энергия, соответствующая потолку валентной зоны; E_i – энергия середины запрещенной зоны; E_C – энергия, соответствующая дну зоны проводимости, $\Delta E = q\Delta\Phi = q(\Phi_s - \Phi_b)$

Согласно теореме Гаусса для вектора электрического смещения:

$$D_{\text{ox}} - D_{\text{Si}} = Q_{i,t}, \quad (5)$$

где D_{ox} – электрическое смещение в оксиде, D_{Si} – электрическое смещение в кремнии, $Q_{i,t}$ – заряд ПС. Тогда

$$\epsilon_{\text{ox}}\epsilon_0 E_{\text{ox}} - \epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0 E_{\text{Si}} = Q_{i,t}. \quad (6)$$

Как известно, в верхней части запрещенной зоны ПС акцептороподобны (могут принять электроны), а в нижней части запрещенной зоны ПС донороподобны (могут отдавать электроны) [18]. Состояния донорного типа положительно заряжены, если расположены выше уровня Ферми, и нейтральны, если расположены ниже уровня Ферми. Состояния акцепторного типа нейтральны, если расположены выше уровня Ферми, и отрицательно заряжены, если расположены ниже уровня Ферми. В рассматриваемом случае подложки p -типа в режиме слабой инверсии вблизи поверхности уровень Ферми лежит выше середины запрещенной зоны, и заряжена только часть акцепторных уровней в промежутке энергий ΔE (рис. 2).

Заряженную часть уровней можно выразить следующим образом:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_g}, \quad (7)$$

где ΔE – это расстояние от середины запрещенной зоны до уровня Ферми вблизи границы Si/SiO_2 .

В таком случае заряд ПС:

$$Q_{i,t} = N_{i,t} q \eta = N_{i,t} q^2 \frac{\Phi_s - \Phi_b}{E_g}, \quad (8)$$

где $N_{i,t}$ – концентрация ПС.

Подставляя (8) в (6), получим:

$$\epsilon_{\text{ox}}\epsilon_0 E_{\text{ox}} - \epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0 E_{\text{Si}} = N_{i,t} q^2 \frac{\Phi_s - \Phi_b}{E_g}. \quad (9)$$

Согласно уравнению Пуассона:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0}, \quad (10)$$

где $\rho(x)$ – плотность полного объемного заряда:

$$\rho(x) = q(-N_A + p(x) - n(x)), \quad (11)$$

$$p(x) = p_0 \exp\left(-\frac{\phi(x)}{\Phi_T}\right), \quad (12)$$

$\rho(x)$ – распределение плотности дырок, p_0 – начальная концентрация дырок,

$$n(x) = n_0 \exp\left(-\frac{\phi(x)}{\Phi_T}\right), \quad (13)$$

$n(x)$ – распределение плотности электронов, n_0 – начальная концентрация электронов.

Преобразуем левую часть (10):

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{d}{dx} \frac{d\phi}{dx} = \frac{d\phi}{dx} \cdot \frac{d}{d\phi} \frac{d\phi}{dx} = -E \frac{-dE}{d\phi} = E \frac{dE}{d\phi}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (10) и интегрируя по ϕ от ϕ_s до 0, получим:

$$\int_{E_{\text{Si}}}^0 E dE = -\frac{q}{\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0} \int_{\phi_s}^0 \left[p_0 \left(\exp\left(-\frac{\phi_s}{\Phi_T}\right) - 1 \right) - n_0 \exp\left(\frac{\phi_s}{\Phi_T}\right) \right] d\phi. \quad (15)$$

С учетом того, что $p_0 = N_a$, а $n_0 = n_i^2 / N_a$, получаем выражение для поля в кремнии E_{Si} :

$$E_{\text{Si}} = \sqrt{\frac{2q\Phi_T N_a}{\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0} \left[\left(\frac{\phi_s}{\Phi_T} + \exp\left(-\frac{\phi_s}{\Phi_T}\right) - 1 \right) + \frac{n_i^2}{N_a^2} \left(\exp\left(\frac{\phi_s}{\Phi_T}\right) - 1 \right) \right]}. \quad (16)$$

Таким образом, система уравнений (3, 4), (9), (16) напрямую связывает величину $V_{g,s}$ с ϕ_s . Изменяя ϕ_s в диапазоне от ϕ_b до $2\phi_b$ и используя выражения (1)–(16), можно численно рассчитать зависимости I_d от $V_{g,s}$ для любых значений плотности накопленного радиационно-индуцированного заряда и концентрации встроившихся ПС.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

В табл. 2 и 3 представлены результаты расчета концентрации ПС и заряда в окисле (Q_{ox}) до и после облучения, а также экспериментально полученные значения максимально выдерживаемого образцом напряжения импульса ЭСР (V_{ESD}). Значения пробивного напряжения при воздействии ЭСР для необлученных образцов находились в диапазоне 3–4 кВ для IRFR4615PbF и 4–4.5 кВ для IRFR3710ZPbF.

Из табл. 2 видно, что для образцов IRFR4615PbF, облученных с дозой 1.78 крад, ПС, накопленные вследствие гамма-облучения, не встраивались, и их концентрация сохранялась на том же уровне, что и до облучения. Для образцов, облученных с дозой 3.9 крад, уже происходило незначительное встраивание, пробивное напряжение при воздействии ЭСР также практически не изменилось. Для образцов IRFR3710ZPbF встраивание ПС происходило при всех значениях поглощенной дозы, и концентрация встроившихся ПС возрастала с ростом поглощенной дозы.

После облучения пробивное напряжения при воздействии ЭСР возросло, что согласуется с предложенной гипотезой о том, что возрастание концентрации встроившихся ПС приводит к деградации

коэффициента усиления паразитного биполярного транзистора, и, как следствие, требуется большее напряжение ЭСР для достижения током коллектора значения, необходимого для начала вторичного пробоя биполярного транзистора. Стоит отметить, что изначальная концентрация ПС в обоих типах образцов очень велика, что затрудняет исследования, и даже при облучении до поглощенной дозы, близкой к дозе отказа, количество встроившихся ПС будет сравнимо с начальной концентрацией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено теоретическое описание физического механизма увеличения пробивного напряжения при воздействии ЭСР после гамма-облучения мощных МОПТ. Основная причина данного явления заключается в деградации коэффициента усиления паразитного биполярного транзистора в структуре МОПТ, которая, в свою очередь, происходит из-за роста темпа рекомбинации в ОПЗ перехода эмиттер-база, пропорционального плотности ПС.

Определена стойкость к ЭСР двух типов мощных МОПТ с помощью специально разработанного генератора ЭСР до и после гамма-облучения. Гамма-облучение исследуемых образцов происходило в режиме измерения порогового напряжения на источнике ^{60}Co при комнатной температуре. До и после облучения снимались сток-затворные ВАХ в подпороговой области из которых в дальнейшем рассчитывалась концентрация ПС. Представлен метод расчета зависимости тока стока от напряжения затвор-исток для любых значений

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные данные для IRFR4615PbF

№ образца	Поглощенная доза, крад (Si)	До облучения		После облучения		
		$N_{i,t}$, см^{-2}	Q_{ox} , Кл	$N_{i,t}$, см^{-2}	Q_{ox} , Кл	V_{ESD} , кВ
1	1.78	$2.5 \cdot 10^{11}$	0	$2.5 \cdot 10^{11}$	$2.3 \cdot 10^{-8}$	2.5
2	1.78	$2.0 \cdot 10^{11}$	0	$2.0 \cdot 10^{11}$	$2.4 \cdot 10^{-8}$	3
3	3.18	$2.2 \cdot 10^{11}$	0	$2.4 \cdot 10^{11}$	$4.8 \cdot 10^{-8}$	3.5
4	3.18	$1.0 \cdot 10^{11}$	0	$1.2 \cdot 10^{11}$	$5.0 \cdot 10^{-8}$	2.5

Таблица 3. Экспериментальные и расчетные данные для IRFR3710ZPbF

№ образца	Поглощенная доза, крад (Si)	До облучения		После облучения		
		$N_{i,t}$, см^{-2}	Q_{ox} , Кл	$N_{i,t}$, см^{-2}	Q_{ox} , Кл	V_{ESD} , кВ
1	2	$5.0 \cdot 10^{11}$	0	$8.0 \cdot 10^{11}$	$5.7 \cdot 10^{-8}$	5.5
2	3.9	$3.0 \cdot 10^{11}$	0	$7.0 \cdot 10^{11}$	$7.1 \cdot 10^{-8}$	5.5
3	3.9	$2.0 \cdot 10^{11}$	0	$6.0 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{-8}$	5.5

плотности накопленного радиационно-индуцированного заряда и концентрации встроившихся ПС. Показано, что с увеличением концентрации встроившихся ПС растет пробивное напряжение образца при воздействии ЭСР.

Вклад авторов

Д.М. Бакеренкова – формулировка гипотезы, разработка метода расчета концентрации поверхностных состояний, проведение экспериментальных исследований, написание статьи.

А.С. Петров – разработка методики проведения экспериментов, валидация результатов, рецензирование и редактирование статьи.

Authors' contributions

D.M. Bakerenkova – hypothesis, development of a method for calculating the concentration of interface states, experimental studies, writing the text of the article.

A.S. Petrov – development of experimental methodology, validation, writing the text of the article, and editing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Падернов В.П., Силкин Д.С., Горячкин Ю.В., Хапугин А.А., Гришанин А.В. Влияние протонного облучения на напряжение пробоя высоковольтного $p-n$ перехода. *Радиотехника и электроника*. 2017;62(6):596–600. <https://www.elibrary.ru/ysugwj>
[Paderov V.P., Silkin D.S., Goryachkin Yu.V., et al. Effect of proton irradiation on the breakdown voltage of a high-voltage $p-n$ junction. *J. Commun. Technol. Electron.* 2017;62(6):616–620. <https://doi.org/10.1134/S1064226917060158>]
[Original Russian Text: Paderov V.P., Silkin D.S., Goryachkin Yu.V., Khapugin A.A., Grishanin A.V. Effect of proton irradiation on the breakdown voltage of a high-voltage $p-n$ junction. *Radiotekhnika i elektronika*. 2017;62(6):596–600 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/ysugwj>]
2. Shu L., Zhao Y.-F., Galloway K.F., Wang L., Wang X.-S., Yuan Z.-Y., Zhou X., Chen W.-P., Qiao M., Wang T.-Q. Effect of Drift Length on Shifts in 400-V SOI LDMOS Breakdown Voltage Due to TID. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2020;67(11):2392–2395. <https://doi.org/10.1109/TNS.2020.2970743>
3. Zhou X., Chen L., Chen C., Qiao M., Li Z., Zhang B. New Insight into Total-Ionizing-Dose Effect-Induced Breakdown Voltage Degradation for SOI LDMOS: Irradiation Charge Field Modulation. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2023;70(4):659–666. <https://doi.org/10.1109/TNS.2022.3231877>
4. Seehra S.S., Slusark W.J. The Effect of Operating Conditions on the Radiation Resistance of VDMOS Power FETs. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1982;29(6):1559–1563. <https://doi.org/10.1109/TNS.1982.4336404>
5. Blackburn D.L., Benedetto J.M., Galloway K.F. The Effect of Ionizing Radiation on the Breakdown Voltage of Power MOSFETs. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1983;30(6):4116–4121. <https://doi.org/10.1109/TNS.1983.4333092>
6. Liang W., Alexandrou K., Klebanov M., Kuo C.-C., Kymissis I., Sundaram K.B., Liou J.J. Characterization of ESD protection devices under total ionizing dose irradiation. In: *IEEE 24th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)*, Chengdu, China: 2017. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IPFA.2017.8060225>
7. Wu M., Lu W., Zhang C., Peng W., Zeng Y., Jin H., Xu J., Chen Z. The impact of radiation and temperature effects on dual-direction SCR devices for on-chip ESD protections. *Semicond. Sci. Technol.* 2020;35(4):045016. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab74ed>
8. Арзамасцева Д.М., Петров А.С., Таперо К.И. Влияние предварительного гамма-облучения на деградацию мощных n -МОПТ при воздействии электростатического разряда. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*. 2023;3:19–22.
[Arzamastseva D.M., Petrov A.S., Tapero K.I. Effect of Preliminary Gamma Irradiation on Degradation of Power N -MOS Transistors Influenced by Electrical Static Discharge. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyuyu apparaturu*. 2023;3:19–22 (in Russ.).]
9. Bakerenkov A.S., Felitsyn V.A., Chubunov P.A., Skorkin I.V. Temperature Dependence of Surface Recombination Current in Bipolar Transistors. In: *5th International Conference on Radiation Effects of Electronic Devices (ICREED)*. Kunming, China: 2023. <https://doi.org/10.1109/ICREED59404.2023.10390896>
10. Kosier S.L., Schrimpf R.D., Nowlin R.N., Fleetwood D.M., DeLaus M., Pease R.L. Charge Separation for Bipolar Transistors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1993;40(6):1276–1285. <https://doi.org/10.1109/23.273541>
11. Lenahan P.M., Dressendorfer P.V. An Electron Spin Resonance Study of Radiation Induced Electrically Active Paramagnetic Centers at the Si/SiO₂ Interface. *J. Appl. Phys.* 1983;54(3):1457–1460. <https://doi.org/10.1063/1.332171>
12. McLean F.B. A Framework for Understanding Radiation-Induced Interface States in SiO₂ MOS Structures. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1980;27(6):1651–1657. <https://doi.org/10.1109/TNS.1980.4331084>
13. Winokur P.S., McGarrity J.M., Boesch H.E. Dependence of Interface-State Buildup on Hole Generation and Transport in Irradiated MOS Capacitors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1976;23(6):1580–1585. <https://doi.org/10.1109/TNS.1976.4328543>
14. Reichert G., Raynaud C., Faynot O., Balestra F., Cristoloveanu S. Temperature dependence (300–600 K) of parasitic bipolar effects in SOI-MOSFETs. In: *Proceedings of the 7th European Solid-State Device Research Conference*. 1997.
15. Saks N.S., Dozier C.M., Brown D.B. Time Dependence of Interface Trap Formation in MOSFETs Following Pulsed Irradiation *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1988;35(6):1168–1177. <https://doi.org/10.1109/23.25435>

16. Winokur P.S., Boesch H.E., McGarrity J.M., McLean F.B. Field- and Time-Dependent Radiation Effects at the Si/SiO₂ Interface of Hardened MOS Capacitors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1977;24(6):2113–2118. <https://doi.org/10.1109/TNS.1977.4329176>
17. McWhorter P.J., Winokur P.S. Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal-oxide-semiconductor transistors. *Appl. Phys. Lett.* 1986;48(2):133–135. <https://doi.org/10.1063/1.96974>
18. Schwank J.R., Shaneyfelt M.R., Fleetwood D.M., Felix J.A., Dodd P.E., Paillet P., Ferlet-Cavrois V. Radiation Effects in MOS Oxides *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2008;55(4):1833–1853. <https://doi.org/10.1109/TNS.2008.2001040>

Об авторах

Бакеренкова Диана Максимовна, инженер-испытатель, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборов» (140080, Россия, Московская обл., г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8). E-mail: arzamasceva.diana@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 8543-8866, <https://orcid.org/0009-0000-8670-812X>

Петров Александр Сергеевич, к.т.н., начальник отдела, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборов» (140080, Россия, Московская обл., г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8). E-mail: as_petrov@inbox.ru. Scopus Author ID 7401779679, SPIN-код РИНЦ 8304-5998, <https://orcid.org/0009-0008-1198-980X>

About the Authors

Diana M. Bakerenkova, Test Engineer, Research Institute of Scientific Instruments (8, Turaevo Industrial Area, Lytkarino, Moscow oblast, 140080 Russia). E-mail: arzamasceva.diana@mail.ru. RSCI SPIN-code 8543-8866, <https://orcid.org/0009-0000-8670-812X>

Aleksandr S. Petrov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, Research Institute of Scientific Instruments (8, Turaevo Industrial Area, Lytkarino, Moscow oblast, 140080 Russia). E-mail: as_petrov@inbox.ru. Scopus Author ID 7401779679, RSCI SPIN-code 8304-5998, <https://orcid.org/0009-0008-1198-980X>