

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»

*На правах рукописи*

Применко Александра Викторовна

**КОМБИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ РЕАКЦИИ  
МОЩНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ДМОП-ТРАНЗИСТОРА  
НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,  
микро- и наноэлектроника,  
приборы на квантовых эффектах

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: Оболенский С.В., д.т.н., директор НИРФИ  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Нижний Новгород,  
2019 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
Глава 1 Литературный обзор.....	17
1.1 Объект исследований: мощный вертикальный ДМОП-транзистор .....	20
1.1.1 Структура и профиль легирования .....	20
1.1.2 Принцип работы .....	25
1.1.3 Технология изготовления .....	28
1.2 Физика радиационного воздействия в полупроводниковых приборах и особенности радиационных эффектов, возникающих в ДМОП-транзисторе при воздействии импульсного гамма-излучения .....	36
1.2.1 Обратимые ионизационные эффекты.....	42
1.2.2 Необратимые ионизационные эффекты.....	45
1.3 Методы учета воздействия импульсного гамма-излучения в математических моделях.....	47
1.3.1 Методы учета в SPICE-моделях влияния импульсного гамма-излучения на работу полупроводниковых приборов .....	47
1.3.2 Методы учета в физико-топологических моделях влияния импульсного гамма-излучения на работу полупроводниковых приборов .....	48
Выводы по главе 1 .....	49
Глава 2 Схемотехническая модель реакции ДМОП-транзистора на воздействие импульса гамма-излучения.....	52
2.1 SPICE-модель МОП-транзистора без учета облучения.....	53
2.2 Доработка встроенной SPICE-модели МОП-транзистора для возможности учета влияния импульсного гамма-излучения на работу прибора .....	65
2.3 Сравнение результатов схемотехнического моделирования с экспериментальными данными.....	75

2.4	Методология интеграции разработанной SPICE-модели в САПР электронных схем.....	80
	Выводы по главе 2.....	83
	Глава 3 Физико-топологическая модель реакции мощного вертикального ДМОП-транзистора на воздействие импульса гамма-излучения.....	85
3.1	Исходные данные, необходимые для разработки модели.....	88
3.2	Основные принципы построения физико-топологической модели ДМОП-транзистора и учет в модели воздействия импульса гамма-излучения.....	90
3.3	Результаты моделирования.....	96
	Выводы по главе 3.....	107
	Глава 4 Технологическая модель мощного вертикального ДМОП-транзистора	109
4.1	Экспериментальные данные о структуре, необходимые для построения модели.....	111
4.2	Восстановление структуры ДМОП-транзистора с помощью технологического моделирования.....	116
4.3	Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.	126
	Выводы по главе 4.....	127
	Заключение.....	128
	Литература.....	130

## Введенные сокращения

SPICE-модель	-	Модель, написанная при помощи симулятора электронных схем;
VМОП-транзистор	-	V-образный МОП-транзистор;
ВАХ	-	Вольт-амперная характеристика;
ДМОП-транзистор	-	МОП-транзистор, изготовленный по технологии двойной диффузии;
ИИ	-	Ионизирующее излучение;
ИС	-	Интегральная схема;
МОП-транзистор	-	Полевой транзистор со структурой типа металл-оксид-полупроводник;
САПР	-	Система автоматизированного проектирования;
ТУ	-	Технические условия;
УГО	-	Условно-графическое обозначение;
ЯВ	-	Ядерный взрыв;

## **Введение**

### **Общая характеристика работы**

При разработке электронных схем военного назначения необходимо оценивать изменения в работе схемы при и после воздействия ионизирующего излучения, для чего требуется разрабатывать модели полупроводниковых приборов, входящих в состав схемы.

Диссертация направлена на решение важной практической задачи: создание методологии разработки модели элемента электронной схемы с применением комплекса из технологического, физико-топологического и схемотехнического моделирования.

Использование различных типов моделирования в комплексе позволит разрабатывать удобные для применения в программах схемотехнического моделирования SPICE-модели, параметры которых определены при помощи физико-топологического моделирования. Технологическое моделирование позволит наиболее корректно задавать исходные данные в виде структуры прибора.

Предметом исследования в данной работе был выбран широко применяемый при проектировании электронных устройств МОП-транзистор, для которого была создана SPICE-модель как без учета радиационных воздействий, так и модифицированная модель с учетом воздействия гамма-излучения. Построение такой модели позволяет однозначно определить методику создания радиационной модели для любого МОП-транзистора.

### **Актуальность темы исследований**

Оценка сохранения работоспособности полупроводниковых приборов в условиях воздействия гамма-излучения является важной задачей при разработке электронных схем космического и военного назначения. Такая оценка необходима ввиду изменений, происходящих в структуре полупроводниковых приборов в результате облучения, и, как следствие, приводящих к временному

нарушению или прекращению работы электрической схемы, в состав которой входят данные приборы.

Указанные изменения зависят от параметров воздействующего излучения, которые в зависимости от условий применения могут существенно отличаться по своим временно-амплитудным характеристикам. Поэтому для прогнозирования работы электронных схем в условиях воздействия ионизирующего излучения с произвольными параметрами необходимо применять математическое моделирование.

Для решения данной задачи обычно используют схемотехнические системы автоматизированного проектирования, которые созданы для расчета работы электронной схемы, элементы схемы при этом заменяются их эквивалентными схемами различной степени детализации (SPICE-модели). Однако данный метод моделирования работы электронных схем в условиях радиационного воздействия осложняется отсутствием SPICE-моделей дискретных компонентов электронных схем российского производства, применяемых при разработке электронных схем специального назначения, как в нормальных условиях, так и в условиях облучения ионизирующими излучениями. С этой точки зрения задача разработки SPICE-моделей полупроводниковых приборов с учетом воздействия ионизирующих излучений является актуальной. С другой стороны, SPICE-модель любого элемента схемы является только его электрическим эквивалентом, в связи с этим, имеет узкую область применения.

Одним из способов расширения области применения модели полупроводникового прибора является применение физико-топологического моделирования, основанного на решении уравнений Пуассона, непрерывности и выражений для плотности диффузионного и дрейфового токов в транзисторе. Благодаря наличию в литературе данных о чувствительности параметров полупроводниковых материалов к воздействию ионизирующих излучений такие модели наиболее полно описывают физические процессы, протекающие в приборе при облучении, и, как следствие, имеют преимущество перед описанными выше SPICE-моделями при оценке реакции прибора на

радиационное воздействие. Однако при использовании такого подхода для разработки модели нужны данные о геометрических размерах и уровнях легирования областей полупроводниковой структуры транзистора. Определение исходных данных зачастую затруднено ввиду отсутствия в документации на прибор указанной информации, что приводит к необходимости проводить дополнительные экспериментальные исследования прибора.

В настоящей работе для определения исходных данных физико-топологической модели использовалось технологическое моделирование, которое применялось для решения обратной задачи: по экспериментальным электрическим характеристикам и геометрическим размерам структуры прибора вычислялись параметры технологии изготовления рассматриваемого прибора. В результате моделирования процесса изготовления транзистора получали параметры его двумерной поперечной структуры.

Таким образом, для расширения возможностей компьютерного моделирования процессов транспорта электронов в полупроводниковых структурах полевых транзисторов в работе предложен *оригинальный* метод, основанный на комбинировании технологического моделирования процессов формирования структуры прибора, физико-топологического моделирования транспорта носителей заряда и схематического моделирования работы прибора в составе электрической схемы. Ранее такой комплекс моделей для анализа работы полупроводниковых приборов в условиях воздействия импульсного гамма-излучения *не применялся*.

Описанный комплекс моделей разрабатывался для описания реакции мощного вертикального МОП-транзистора, изготовленного по технологии двойной диффузии (ДМОП-транзистора), на воздействие импульсного гамма-излучения ядерного взрыва (ЯВ). Эффекты, возникающие в таком типе транзисторов при облучении, отличаются от эффектов, возникающих в традиционном горизонтальном МОП-транзисторе, и ранее детально *не исследовались*.

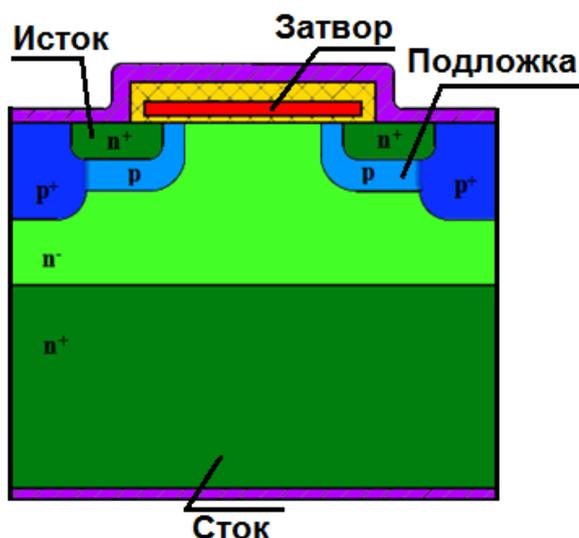


Рисунок 1 – Структура

ДМОП-транзистора:

$p^+$  сильнолегированная область истока;

$p$  область подложки;

$p^+$  сильнолегированная область подложки;

$n^-$  слаболегированная область дрейфа в стоке;

$p^+$  сильнолегированная область стока

Отличия в эффектах определяются особенностями структуры ДМОП-транзистора (см. рисунок 1), отличающими его от традиционного «горизонтального» МОП-транзистора:

1) вертикальная структура прибора обеспечивает высокие выходные токи транзистора и напряжение пробоя. При этом образована данная структура чередованием двух  $p$ - $n$  переходов:  $p^+$  область истока -  $p$  область подложки и  $p$  область подложки -  $n^-$  область дрейфа в стоке. Области истока и подложки в процессе производства формируются с помощью ионного легирования и высокотемпературной диффузии, в результате чего распределение примеси в этих областях имеет сложный и неоднородный характер, как по глубине, так и в латеральном направлении.

2) короткий канал транзистора (длина  $l \sim 1$  мкм) определяет большую крутизну ВАХ и низкое сопротивление прибора в открытом состоянии. Длина канала, в свою очередь, определяется точностью технологии изготовления  $p^+$  области истока в  $p$  области подложки.

Кроме того, протекание токов в транзисторе при воздействии импульса гамма-излучения задействует такие области полупроводниковой структуры, которые в штатном режиме работы являются диэлектрическими и/или слабо проводящими.

Все выше перечисленные особенности структуры исследуемого типа транзистора привели к необходимости воссоздания всех рабочих областей, ответственных за рассматриваемые эффекты, со сложным распределением примеси в каждой, при помощи технологического моделирования с целью корректного задания исходных данных и, как следствие, построения достоверной физико-топологической модели.

В результате применения технологического моделирования были получены двумерные профили концентрации доноров и акцепторов в р-п переходах, необходимые для проведения расчетов процессов пробоя транзистора при воздействии импульсного гамма-излучения. В результате применения физико-топологического моделирования удалось рассчитать транспорт электронов в областях структуры исследуемого типа транзистора при воздействии импульса гамма-излучения и, как следствие, возникающий в этой структуре ионизационный ток. Применение схематехнического моделирования позволило оценить реакцию исследуемого типа транзисторов на воздействие импульса гамма-излучения и может быть использовано для анализа работы электрической схемы на основе данного элемента. Результаты расчетов хорошо коррелируют с экспериментальными данными, что позволяет сделать заключение об адекватности предложенной комплексной модели.

Таким образом, для полупроводниковых приборов с двумерным неоднородным распределением носителей заряда в рабочих областях структуры оптимальным представляется предложенный комплексный метод на основе схематехнической SPICE-модели с использованием результатов расчетов по физико-топологической модели, использующей исходные данные, полученные при помощи технологического моделирования.

## Цель диссертации

Целью проводимой работы являлось разработка и исследование возможностей комбинированной математической модели процессов транспорта электронов в мощном вертикальном ДМОП-транзисторе в условиях воздействия импульсного гамма-излучения.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

**1.** Разработка и исследование возможностей технологической модели процессов формирования структуры мощного вертикального ДМОП-транзистора с целью восстановления его конструкции и определения исходных данных для физико-топологической модели;

**2.** Разработка и исследование возможностей физико-топологической модели транспорта носителей заряда в мощном вертикальном ДМОП-транзисторе при воздействии импульсного гамма-излучения с целью определения необходимых элементов, которыми нужно дополнить эквивалентную схему, лежащую в основе SPICE-модели исследуемого транзистора, а также зависимостей параметров этих элементов от воздействующего импульсного гамма-излучения;

**3.** Разработка и исследование возможностей SPICE-модели мощного вертикального ДМОП-транзистора, учитывающей реакцию транзистора на воздействие импульсного гамма-излучения для последующего использования при проектировании радиационно-стойкой аппаратуры.

## Научная новизна

В диссертации впервые:

**1.** Была разработана методология определения параметров структуры мощного вертикального ДМОП-транзистора при помощи технологического моделирования с целью получения исходных данных для разработки физико-топологической модели транспорта электронов в активной области транзистора с учетом воздействия гамма-излучения со значениями мощности экспозиционной дозы вплоть до  $10^{12}$  Р/с.

2. Разработан комплекс, состоящий из схемотехнической, физико-топологической и технологической моделей мощного вертикального ДМОП-транзистора, позволяющий рассчитывать его реакцию на воздействие импульса гамма-излучения с учетом особенности транспорта электронов в структуре с двумерными профилями концентрации доноров и акцепторов.

3. Было проведено исследование работы мощного вертикального ДМОП-транзистора при воздействии импульсного гамма-излучения при помощи комплекса, состоящего из технологического, физико-топологического и схемотехнического типов моделирования.

### **Практическая значимость работы**

1. Использование физико-топологической модели позволило провести анализ реакции ДМОП-транзистора на импульсное гамма-излучение. Показано, что при воздействии импульсного гамма-излучения с мощностью экспозиционной дозы  $P_\gamma$  до  $10^{11}$  Р/с значения ионизационных токов не выходят из области рабочих токов транзистора, а при воздействии импульсного гамма-излучения с мощностью экспозиционной дозы  $P_\gamma$  начиная с  $5 \cdot 10^{11}$  Р/с ионизационные токи превышают рабочие токи транзистора на время более 100 нс.

2. SPICE-модель мощного вертикального ДМОП-транзистора позволила оценивать его работу в условиях импульсного гамма-излучения с погрешностью не более 30 %. Разработанная модель может быть использована при моделировании схем на основе данного типа транзисторов и, в результате, для создания специальных радиотехнических схем защиты.

3. Сохранение разработанной SPICE-модели в виде самостоятельного элемента библиотеки позволило сократить время расчетов при проведении схемотехнического моделирования радиотехнической аппаратуры.

## **На защиту выносятся:**

**1.** Физико-топологическая модель мощного вертикального ДМОП-транзистора с учетом воздействия импульсного гамма-излучения. Утверждается, что данная модель адекватно описывает работу исследуемого транзистора при воздействии импульсного гамма-излучения со значениями мощности экспозиционной дозы вплоть до  $10^{12}$  Р/с с погрешностью 30 %.

**2.** Метод применения технологического моделирования для определения параметров структуры мощного вертикального ДМОП-транзистора с целью разработки более корректной физико-топологической модели данного транзистора на воздействие ионизирующих излучений.

**3.** Схемотехническая SPICE-модель мощного вертикального ДМОП-транзистора с учетом влияния на работу транзистора импульсного гамма-излучения. Утверждается, что данная модель позволяет проводить оценки работы электронных схем, разработанных на основе рассмотренного транзистора, в САПР электронных схем с учетом влияния импульсного гамма-излучения.

## **Практическое использование**

Предложенные в работе методы были успешно использованы для выполнения ряда научно – исследовательских и опытно – конструкторских работ в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина».

## **Личный вклад автора**

В работе вклад автора является определяющим с точки зрения постановки задачи, разработки метода создания модели реакции полупроводникового прибора с двумерным неоднородным распределением концентрации носителей заряда в рабочих областях на основе комплекса, состоящего из технологического, физико-топологического и схемотехнического типов моделирования. Все расчеты, результаты которых представлены в диссертации, проведены автором.

Все экспериментальные данные были получены сотрудниками ФГУП «РФЯЦ ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» в г. Снежинск.

## **Благодарности**

За предоставленные экспериментальные данные автор выражает благодарность сотрудникам ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»: В.П. Шукайло, О.В. Ткачеву, С.М. Дубровских, А.Н. Грецовой, П.С. Применко.

Особую благодарность автор выражает научному руководителю С.В. Оболенскому за помощь на всех этапах выполнения диссертации.

## **Публикации и апробация результатов**

Основные результаты диссертации отражены в 31 публикации, в том числе, в 7 статьях в реферируемых журналах, 6 научно-технических отчетах и 6 тезисах и трудах научных конференций и семинаров. Результаты, представленные в работе, апробированы на всероссийских научно-технических конференциях «Стойкость-2015», «Стойкость-2016», «Стойкость-2017», XIX, XX, XXII международных конференциях «Нанозифика и нанозлектроника», X, XI, XII межотраслевых конференциях по радиационной стойкости.

## Список основных публикаций по теме диссертации

*Статьи, опубликованные в журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук:*

1. А.С. Аверяскин, А.В. Хананова. Математическое моделирование полупроводниковых элементов и функционирования схем на их основе после нейтронного облучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, №1, с. 46-50, 2012г.

2. А.В. Хананова, А.С. Аверяскин. Моделирование работы электронных схем при радиационном воздействии // Вестник Нижегородского Университета им. Н.И. Лобачевского, №2, с. 52-55, 2013г.

3. А.В. Хананова, А.С. Аверяскин. Создание и верификация SPICE-модели МОП-транзистора с учетом импульсного гамма-излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, №4, с. 16-19, 2014г.

4. А.В. Хананова, А.С. Аверяскин. Математическое моделирование работы биполярного транзистора и схемы на его основе в условиях воздействия нейтронного излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, №3, с.28-31, 2015г.

5. Е.А. Тарасова, А.В. Хананова, С.В. Оболенский, В.Е. Земляков, Ю.Н. Свешников, В.И. Егоркин, В.А. Иванов, Г.В. Медведев, Д.С. Смотрин. Исследование распределения электронов в GaN и GaAs структурах после  $\gamma$ -нейтронного облучения // Физика и техника полупроводников, т. 50, № 3, с. 331-338, 2016.

E.A. Tarasova, A.V. Khananova, S.V. Obolenskii, V.E. Zemlyakov, Yu.N. Sveshnikov, V.I. Egorkin, V.A. Ivanov, G.V. Medvedev, D.S. Smotrin. Study of

the Electron Distribution in GaN and GaAs after  $\gamma$ -Neutron Irradiation// Semiconductors, V. 50, № 3, p. 326-333, 2016.

6. Е.А. Тарасова, Е.С. Оболенская, А.В. Хананова, С.В. Оболенский, В.Е. Земляков, В.И. Егоркин, А.В. Неженцев, А.В. Сахаров, А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, Г.В. Медведев. Теоретические и экспериментальные исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик НЕМТ структур и полевых транзисторов // Физика и техника полупроводников, т. 50, № 12, с. 1599-1604, 2016.

E.A. Tarasova, E.S. Obolenskaya, A.V. Khananova, S.V. Obolenskii, V.E. Zemlyakov, V.I. Egorkin, A.V. Nezhentsev, A.V. Sakharov, A.F. Tsatsulynikov, V.V. Lundin, E.E. Zavarin, G.V. Medvedev. Theoretical and Experimental Studies of the Current–Voltage and Capacitance–Voltage of HEMT Structures and Field-Effect Transistors // Semiconductors, v. 50, № 12. p. 1599-1604, 2016.

7. А.В. Хананова, С.В. Оболенский. Разработка физико-топологической модели реакции мощного вертикального ДМОП-транзистора на воздействие импульсного гамма-излучения// Физика и техника полупроводников, 2018 г, Т.52, в.№11, с. 1366-1372.

*Публикации в сборниках трудов конференций с международным участием:*

1. Тарасова Е.А., Хананова А.В., Оболенский С.В., Земляков Ю.Н., Свешников Ю.Н., Иванов В.А., Медведев Г.В., Смотрин Д.С. Исследование процессов в GaN- и GaAs-структурах при воздействии гамма-нейтронного облучения / Сборник трудов XIX международной конференции «Нанозифика и наноэлектроника»,: 10–14 марта, 2015 г.: т.2, 2015 г. с. 605–606.

2. Малин Т.В., Мансуров В.Г., Журавлев К.С., Земляков В.Е., Егоркин В.И., Парнес Я.М., Тарасова Е.А., Оболенская Е.С., Хананова А.В., Оболенский С.В., Медведев Г.В. Теоретические и экспериментальные исследования вольт-фарадных и импульсных характеристик НЕМТ структур и полевых транзисторов /

Сборник трудов XX международной конференции «Нанofизика и наноэлектроника», 14–18 марта 2016 г., т.2, 2016 г., с. 655–656.

3. А.В. Хананова, С.В. Оболенский. Разработка модели мощного вертикального ДМОП-транзистора с учетом воздействия гамма-излучения. Сборник трудов XXII международной конференции «Нанofизика и наноэлектроника»: 12–15 марта, 2018 г.: т.2, 2018 г., с.801-802.

## Глава 1 Литературный обзор

Первая глава представляет собой обзор литературных данных по проблеме воздействия ионизирующих излучений ядерного взрыва и моделирования реакции полупроводниковых приборов на такое воздействие.

В п. 1.1 кратко описана структура, принцип работы, область применения и технология изготовления исследуемого типа транзистора.

В п. 1.1.1 приведен анализ литературных данных о возможных видах структуры мощных МОП-транзисторов с коротким каналом. Известно, что такие транзисторы могут быть двух типов с отличными структурами:

V-образный МОП-транзистор (VМОП-транзистор) и вертикальный МОП-транзистор, изготавливаемый двойной диффузией (ДМОП-транзистор). Кроме того, ДМОП-транзисторы, в основе работы которых лежит один принцип, могут быть изготовлены по различным технологиям HEXFET и SIPMOS, образующих различную геометрию структуры. В результате экспериментальных исследований было определено, что исследуемый транзистор является мощным вертикальным ДМОП-транзистором, изготовленным по технологии HEXFET. Данный тип транзисторов образован несколькими десятками тысяч периодически повторяющихся элементарных транзисторов в виде шестиугольников, ток каждого из которых вносит вклад в общий ток транзистора.

В п. 1.1.2 кратко рассмотрен принцип работы мощного вертикального ДМОП-транзистора, изготовленного по технологии HEXFET. Данный тип приборов является транзистором с индуцированным каналом.

В п. 1.1.3 рассмотрен технологический процесс изготовления мощного вертикального ДМОП-транзистора.

В п. 1.2 описаны основные типы радиационного облучения и их воздействие на МОП-транзисторы. Приведены особенности радиационных эффектов, происходящих в мощном вертикальном ДМОП-транзисторе.

В п. 1.2.1 рассмотрены возможные обратимые эффекты, возникающие в ДМОП-транзисторе при облучении импульсным гамма-излучением. Известно, что взаимодействие гамма-квантов с полупроводником приводит к ионизации материала: происходит генерация дополнительных электронно-дырочных пар, которые при поданных на структуру напряжениях двигаются в электрических полях и образуют в р-п переходах ионизационные токи, являющиеся паразитными для работы прибора. Амплитуда и временная зависимость данных токов определяется как параметрами воздействующего ионизирующего излучения, напряжением, приложенным к р-п переходу, так и параметрами структуры прибора. Также известно, что ионизационный ток р-п перехода имеет две компоненты: мгновенную, определяемую носителями, образованными в момент облучения в области пространственного заряда, и запаздывающую, определяемую носителями, образованными вне области р-п перехода.

Обе компоненты ионизационного тока, складываясь, увеличивают начальный обратный ток через переход на время, определяемое длительностью импульса излучения и временем восстановления равновесного состояния.

В п. 1.2.2 рассмотрены возможные необратимые эффекты, возникающие в ДМОП-транзисторе при облучении импульсным гамма-излучением. Известно, что воздействие гамма-излучения приводит, в том числе, и к необратимым эффектам структуры транзистора. В основном, для рассматриваемого типа полупроводниковых приборов необратимые изменения являются накоплением заряда в подзатворном диэлектрике, образованном вследствие накопления материалом поглощенной дозы. Показано, что при рассмотрении в качестве воздействующего фактора импульса гамма-излучения, значение дозы, поглощенной за время действия импульса, не приводит к необратимым изменениям в работе прибора.

В п. 1.3 приведен обзор существующих методов учета радиационных эффектов при проведении схемотехнического и физико-топологического моделирования

В п. 1.3.1 рассмотрены основные существующие методы учета импульсного гамма-излучения в SPICE-моделях для проведения схемотехнического моделирования. Показано, что при разработке SPICE-моделей полупроводниковых приборов с учетом воздействия ионизирующих излучений возникающие обратимые эффекты учитывают введением в эквивалентные схемы этих приборов дополнительных сопротивлений и/или генераторов, параметры которых зависят от воздействующего фактора, изменяющегося во времени.

В п. 1.3.2 рассмотрены методы учета импульсного гамма-излучения в физико-топологических моделях. Физико-топологические модели основаны на решении базовых уравнений физики полупроводников и наиболее полно описывают физические процессы, протекающие в приборе. Благодаря наличию в литературе данных о чувствительности параметров полупроводниковых материалов к радиационному воздействию и возможности оперировать при моделировании именно параметрами полупроводниковых материалов данные модели имеют преимущество перед описанными выше SPICE-моделями при оценке реакции прибора на радиационное воздействие.



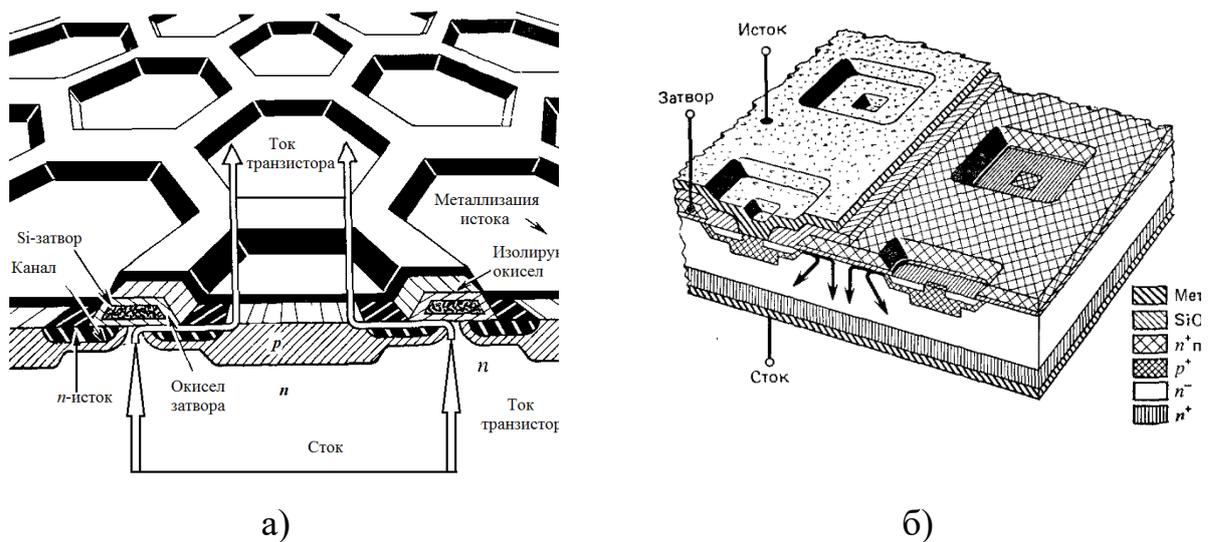


Рисунок 3 - Особенности структуры ДМОП-транзистора, изготовленного по технологии: а) HEXFET; б) SIPMOS

Таким образом, видно, что структуры мощных МОП-транзисторов могут быть различными, и в каждом случае структура определяет принцип работы транзистора. Следовательно, для анализа радиационных эффектов, которые будут возникать в приборе в условиях облучения, необходимо иметь информацию о его структуре и использовать данную информацию при разработке модели.

Данная информация разработчиком полупроводникового прибора в нормативных документах не приводится, поэтому были проведены экспериментальные исследования структуры данного транзистора с использованием электронного микроскопа. В результате таких исследований было определено, что исследуемый транзистор имеет структуру МОП-транзистора, изготовленного методом двойной диффузии по технологии HEXFET (см. рисунок 3а). Экспериментальные данные, из которых становится понятна структура исследуемого транзистора, и их анализ подробно изложены в п. 4.1.

Поэтому в данной работе под исследуемым транзистором будем понимать мощный вертикальный ДМОП-транзистор, изготовленный методом двойной диффузии по технологии HEXFET (см. рисунок 3а). Данный транзистор образован несколькими десятками тысяч элементарных транзисторов, ток каждого из которых вносит вклад в общий ток транзистора ввиду вертикальности структуры.

Так как структура транзистора периодичная, то для удобства анализа процессов, происходящих в такой структуре, будем рассматривать единичную ячейку транзистора (см. рисунок 4).

Известно, что в структуре ДМОП-транзисторов, изготовленных методом двойной диффузии, можно выделить четыре основные области (см. рисунок 4):  $n^+$  - сильнолегированная область истока,  $p$ -область подложки,  $n^-$  - слаболегированная область дрейфа в стоке,  $n^+$  - сильнолегированная область стока [1]. Кроме того, в целях предотвращения включения паразитного биполярного транзистора в структуре формируется  $p^+$ -область подложки, а для снижения сопротивления сток-исток в открытом состоянии ( $R_{си\text{ отк}}$ )  $n^-$ -дрейфовая область подлегируется и появляется приповерхностный слой с проводимостью  $n$ .

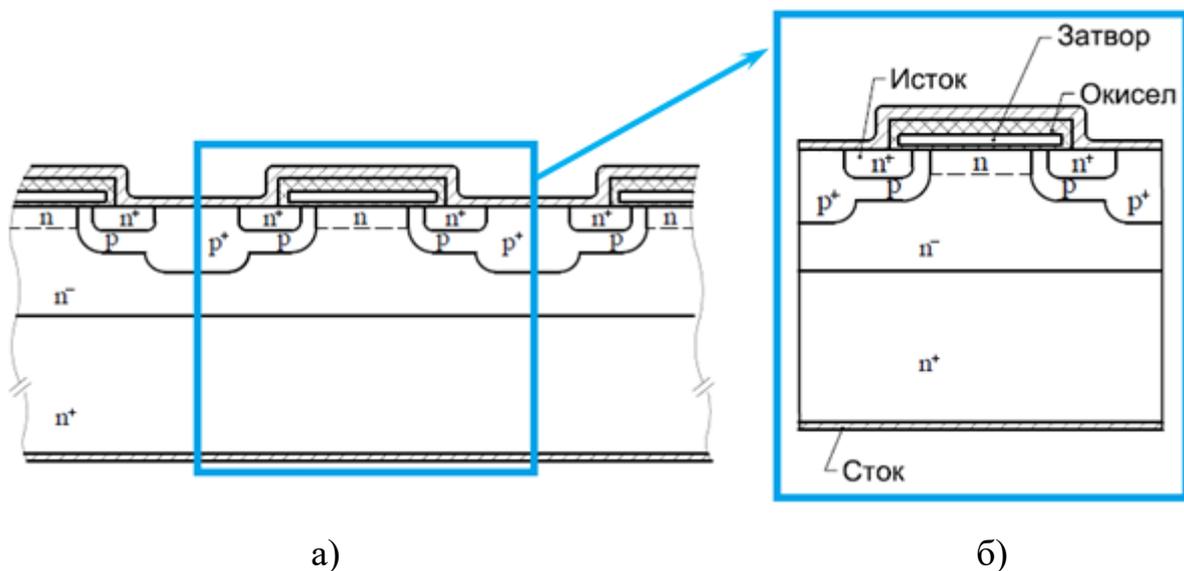


Рисунок 4 – Схематичное изображение структуры (а) и единичной ячейки (б) исследуемого транзистора

Недостатком конструкции являются сопутствующие паразитные элементы. Как будет показано в п. 1.2.2, чередование в структуре прибора высоколегированной  $n^+$ -области истока,  $p$ -области подложки и  $n^-$ - дрейфовой области в стоке полезной MOSFET-структуры одновременно представляет собой эмиттер, базу и коллектор сопутствующей паразитной биполярной структуры (см. рисунок 18). В п. 1.2.2 будет показано, что при воздействии импульса гамма-излучения наличие сопутствующей биполярной структуры может приводить к вторичному пробое и последующему катастрофическому отказу транзистора. При этом видно, что чем меньше толщина и уровень легирования  $p$ -области и больше ее протяженность, тем сильнее будет проявляться паразитное действие биполярной структуры. И, наоборот, при меньшей протяженности, больших толщинах и уровнях легирования  $p$ -области вредное влияние биполярной структуры будет более слабым.

Поэтому при конструировании ищут эффективные меры для нейтрализации паразитного действия биполярной структуры. Основным приемом для подавления этого эффекта является соединение эмиттера и базы паразитного транзистора ( $n^+$ -истоковой области и  $p$ -области подложки исследуемой структуры) металлическим электродом истока на планарной поверхности транзистора [1]. Наиболее эффективным данное конструктивное решение является в случае, когда омическое сопротивление  $p$ -области (области базы биполярной структуры  $r_6$ ) близко к нулю. В целях снижения данного сопротивления при изготовлении в структуре транзистора формируется высоколегированная  $p^+$ -область (см. рисунок 4). Однако при конечном сопротивлении  $r_6$  паразитный биполярный эффект может все же проявиться и в первую очередь в наиболее удаленных от истоковой перемычки участках  $p$ -области.

Электрические характеристики транзистора зависят не только от структуры, но еще и от профиля легирования структуры. Профиль легирования показывает распределение концентрации носителей  $N_{np}$  по координате. В транзисторе рассматриваемого типа распределение примеси в основных рабочих слоях

структуры формируется с помощью ионного легирования и имеет сложный и неоднородный характер, как по глубине, так и в латеральном направлении.

Профиль легирования исследуемого транзистора производителем не предоставляется. Однако в литературе приводится профиль легирования зарубежного транзистора, который является аналогичным исследуемому транзистору по расстоянию между ячейками, равному 12 мкм (см. п. 4.1), и значению напряжения питания  $U_{пит}=30$  В [3]. На рисунке 5 показан профиль легирования зарубежного аналога исследуемого типа транзистора, место расположения данного профиля в структуре прибора показано пунктиром на врезке к рисунку. В дальнейшем при технологическом моделировании будем ориентироваться именно на данный профиль.

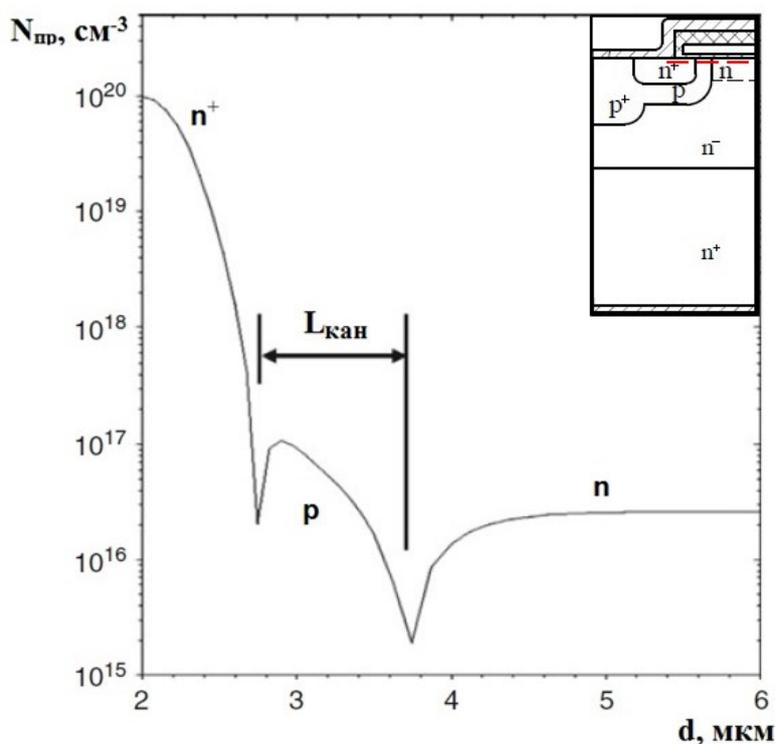


Рисунок 5 – Профиль легирования зарубежного аналога исследуемого транзистора

### 1.1.2 Принцип работы

Основные принципы, на которых основана работа такого типа прибора, проиллюстрированы на элементарной ячейке исследуемого типа транзистора на рисунке 6 [1]. Исследуемый транзистор относится к категории транзисторов с индуцированным n-каналом, поэтому когда на затвор не подается напряжение, транзистор выключен. Чтобы отпереть такой транзистор на затвор нужно подать положительное напряжение, при этом в диэлектрике сразу же возникает электрическое поле, которое притягивает электроны, находящиеся в р-области (рисунок 6а). При подаче на затвор напряжения, превышающего пороговое значение, по мере скопления свободных электронов вдоль поверхности под положительно заряженным электродом затвора происходит инверсия проводимости данной части подложки и образуется n-канал. Теперь между истоком и стоком может протекать ток, и транзистор оказывается включенным (рисунок 6б) [1].

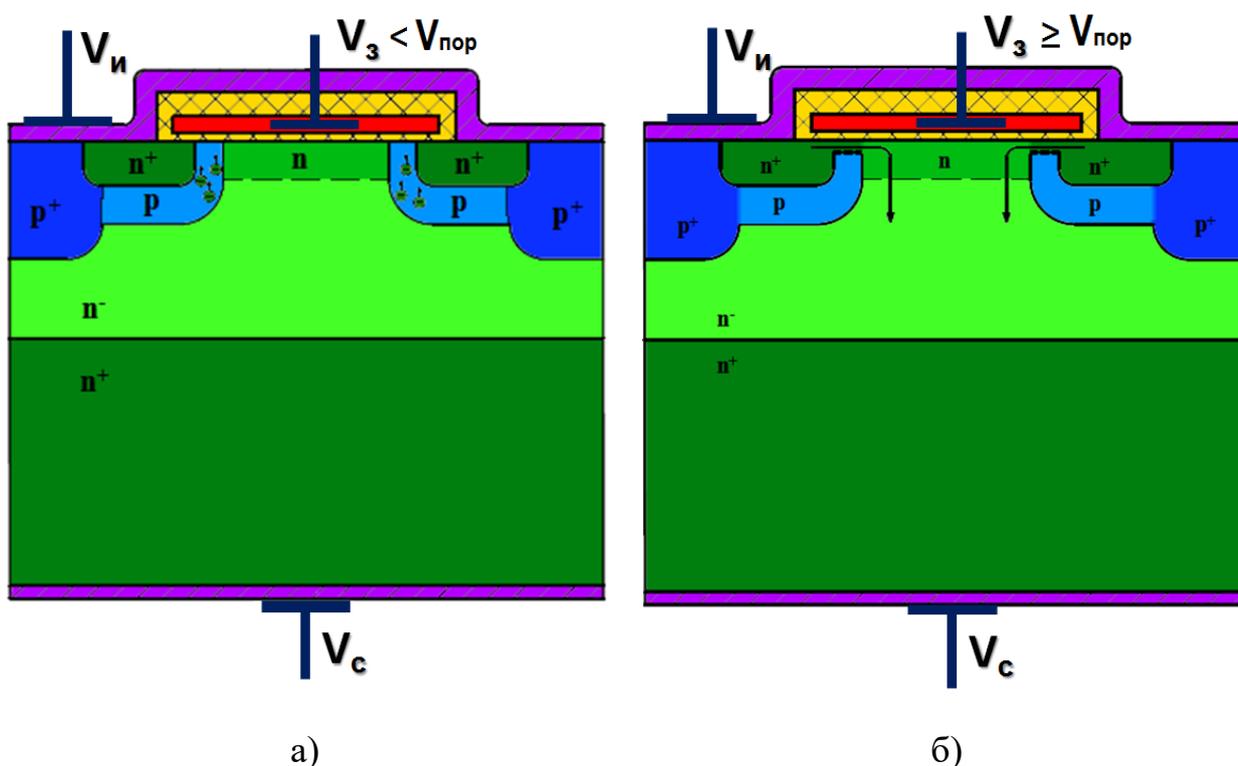


Рисунок 6 – Принцип работы мощного вертикального ДМОП-транзистора

Данный вид транзисторов имеет следующие преимущества относительно планарного МОП-транзистора [1]:

- вертикальная структура прибора позволяет обеспечивать высокие выходные токи транзистора, что, в свою очередь, дает возможность применения транзисторов такого типа в силовой электронике;
- данный тип транзисторов представляет собой транзистор с коротким каналом, при этом известно, что крутизна МДП-транзистора обратно пропорциональна, а сопротивление открытого прибора прямо пропорционально длине канала. Поэтому данная структура обеспечивает большую крутизну и низкое сопротивление прибора в открытом состоянии;
- малые размеры рассматриваемой структуры с коротким каналом обеспечивают малые паразитные емкости;
- использование вертикальной структуры позволяет транзистору выдерживать чрезвычайно высокие напряжения;
- вследствие сравнительно небольших размеров еще одним преимуществом данной структуры является экономическая эффективность.

Так как рассматриваемый тип прибора относится к силовым приборам, то ниже приведем основные отличия от других типов силовых приборов, таких как мощные биполярные транзисторы и транзисторы на основе GaAs и GaN [4 - 6]:

1) в полевых транзисторах, как в мощных МОП-транзисторах, так и в транзисторах на основе GaAs и GaN, управление осуществляется напряжением, поэтому необходима относительно низкая управляющая мощность. В то время как в мощных биполярных транзисторах управление осуществляется током, поэтому управляющая мощность увеличивается при увеличении тока нагрузки.

2) у МОП-транзисторов потери зависят от сопротивления в открытом состоянии, что даёт преимущество как при низких, так и при высоких мощностях в низковольтных схемах, но ограничивает их применение в высоковольтных схемах. Потери в открытом состоянии в биполярных транзисторах зависят от величины напряжения насыщения, что даёт преимущество при больших мощностях нагрузки в высоковольтных схемах, но является недостатком в

низковольтных схемах. У транзисторов на основе GaAs и GaN сопротивление в открытом состоянии ниже по сравнению с МОП-транзисторами, что позволяет использовать их при больших мощностях в низковольтных схемах, при этом рабочие напряжения значительно ниже по сравнению с биполярными и МОП-транзисторами.

3) рабочие напряжения в силовых приборах возрастают в следующем порядке: GaAs-, GaN-, МОП-, биполярные транзисторы.

4) рабочие частоты в силовых приборах возрастают в следующем порядке: биполярные транзисторы, МОП-, GaN-, GaAs-транзисторы.

5) влияние температуры на характеристики силовых приборов уменьшается в следующем порядке: биполярные транзисторы, МОП-, GaAs-, GaN-транзисторы.

6) биполярные транзисторы применяют в низкочастотных высоковольтных схемах большой мощности. Мощные МОП-транзисторы применяют при относительно невысокой частоте в широком диапазоне мощностей и напряжений, вплоть до высоковольтных схем. GaAs-транзисторы применяют в СВЧ-схемах при самых высоких требованиях к частотным характеристикам и относительно невысоких требованиях к мощности. GaN-транзисторы применяют в СВЧ-схемах при умеренных требованиях к частотным характеристикам и высоких требованиях к мощности.

Структура полупроводникового прибора определяет не только электрические характеристики прибора, но и его реакцию на воздействие ионизирующих излучений. GaAs и GaN –транзисторы имеют принципиально отличную от МОП-транзистора структуры, и, как следствие, отличную реакцию на воздействие ионизирующих излучений. Подробно вопрос реакции таких приборов на воздействие радиационных эффектов рассмотрен в [7]. В то же время мощные биполярные транзисторы ввиду схожести конструкции с мощными МОП-транзисторами также подвержены возникновению ионизационных токов в р-п переходах при воздействии импульсного гамма-излучения [8]. Однако принцип управления данных приборов отличается от МОП-транзистора, что также определяет различия в отклике такого типа

приборов на радиационное воздействие. Кроме того, некоторых радиационных эффектов, присущих МОП-транзистору, таких как накопление заряда в подзатворном диэлектрике, не наблюдается в структурах, отличных от МОП-структуры.

### 1.1.3 Технология изготовления

Выше было показано, что исследуемый МОП-транзистор изготавливается методом двойной диффузии. Основные этапы технологического процесса данной технологии и их последовательность следующие [1, 2 - 3, 11]:

1. Выращивание толстого защитного слоя изолятора ( $\text{SiO}_2$  или  $\text{SiO}_2+\text{Si}_3\text{N}_4$ ) на планарной поверхности  $n^- n^+$ - пластины, формирование окон в слое изолятора (см. рисунки 7а и 7б) [1, 2 - 3, 11]. Толщины и концентрации  $n^+$  пластины и  $n^-$  эпитаксиального слоя определяют сопротивление этих областей, а также напряжение, при котором может произойти пробой;

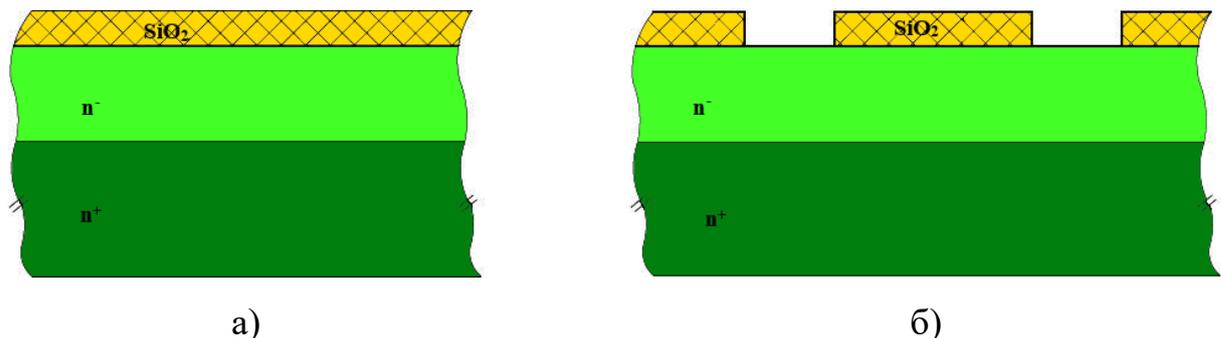


Рисунок 7 – Формирование пластины, на которой будет производиться имплантация для создания карманов

2. Создание в обнаженных участках  $n^-$ -слоя высоколегированных  $p^+$ -областей ионной имплантацией (см. рисунок 8) [1, 2 - 3, 11]. Энергия и доза имплантируемых ионов определяет геометрические размеры кармана, который получится в дальнейшем, а также концентрацию неосновных носителей в кармане. Создание данной области является одним из методов ликвидации паразитного биполярного транзистора;

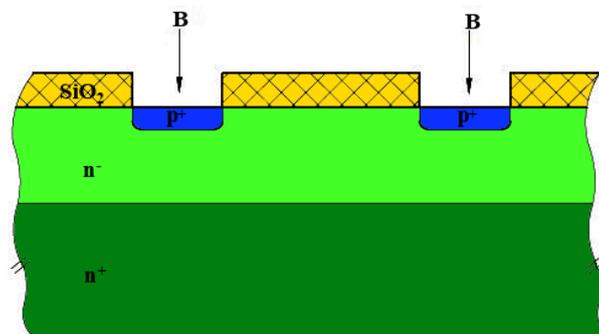


Рисунок 8 – Создание  $p^+$ -областей

3. Окисление и последующее формирование фотолитографией островков изолятора над  $p^+$ -областями (см. рисунки 9а и 9б) [1, 2 - 3, 11]. Данный этап является подготовительным для создания  $p$  и  $n^+$  областей;

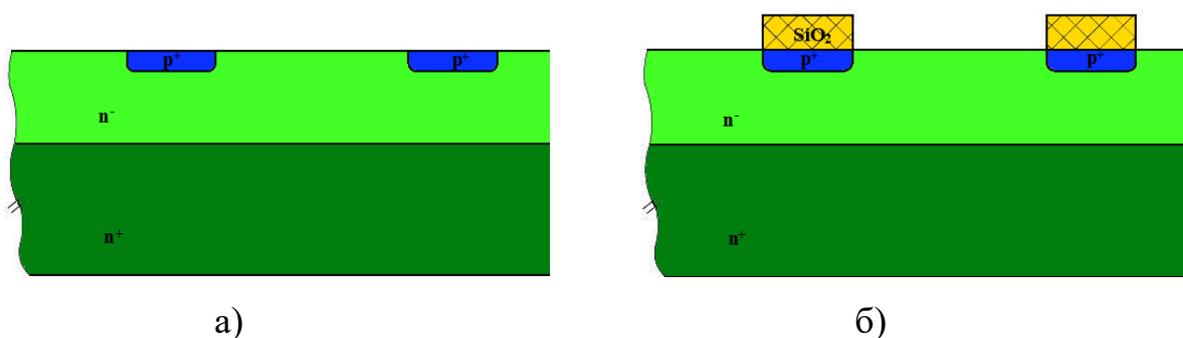


Рисунок 9 – Формирование фотолитографией островков изолятора над  $p^+$ -областями

4. Подлегирирование высокоомного  $n^-$  эпитаксиального слоя донорной примесью в промежутках между высоколегированными  $p^+$  областями имплантацией ионов фосфора с энергией 120 кэВ и дозой  $10^{11} \dots 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Данная операция необходима для снижения сопротивления сток-исток  $R_{СИ\text{отк}}$  (см. рисунок 10) [1, 2 - 3, 11].

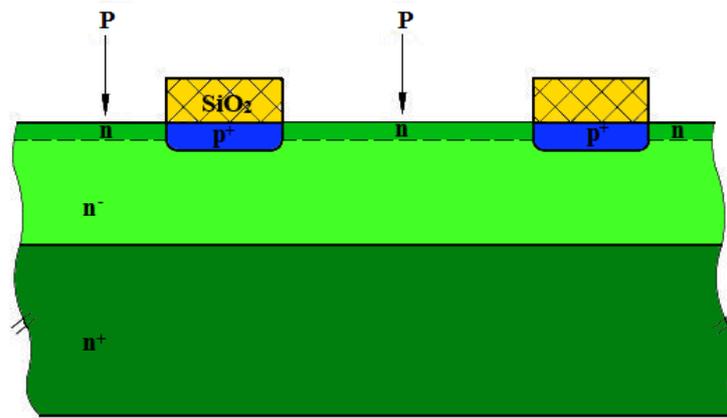


Рисунок 10 – Подлеги́рование высокоомного  $n^-$  эпитаксиального слоя

5. Выращивание изолятора затвора на планарной поверхности подложки в центральной зоне кристалла и нанесение поверх изолятора слоя поликремния, легирование поликремния донорной примесью высокой концентрации (см. рисунок 11) [1, 2 - 3, 11];

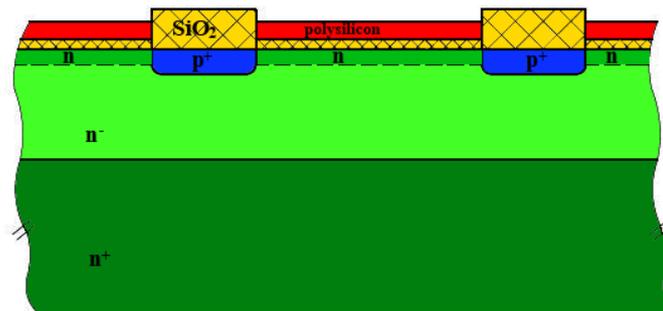


Рисунок 11 – Выращивание изолятора затвора и нанесение поверх изолятора слоя поликремния

6. Формирование затвора в центральной зоне кристалла и полевых электродов на его периферии. Удаление из прилегающих к высоколегированным  $p^+$ -областям участков изолятора затвора в центральной зоне структуры. Создание вокруг областей  $p^+$  в центральной зоне кристалла  $p^-$  и  $n^+$ -областей производится в два этапа: загонка примеси посредством ионной имплантации сначала акцепторной, а затем донорной примеси в открытые участки подложки с дальнейшей разгонкой методом высокотемпературной диффузии (см. рисунок 12) [1, 2 - 3, 11].

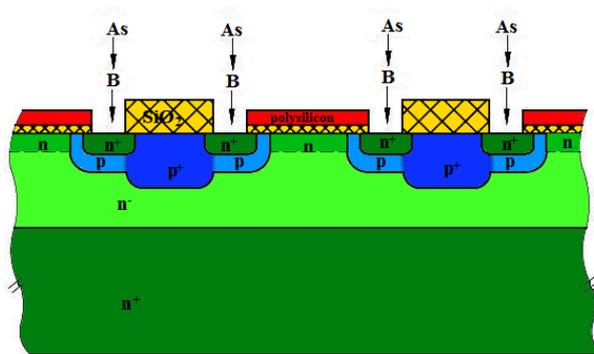


Рисунок 12 – Создание ионной имплантацией p и n<sup>+</sup> областей

Параметрами данных этапов технологии являются: энергия  $E$  и доза  $Q$  имплантируемых в кремний атомов примеси, время  $t$  и температура  $T$  диффузии. Значения данных параметров определяют геометрические размеры p и n<sup>+</sup> областей, которые получатся в результате всех технологических операций, а также концентрацию неосновных носителей в этих областях. Энергия  $E$ , с которой имплантируется ион, определяет пробег этого иона в материале [10, 11]. При имплантации траектории отдельных ионов подобны ломаным линиям, каждый прямолинейный участок и полная длина которых отличаются друг от друга. Практическую важность имеет средний нормальный пробег  $R_p$  - проекция траектории среднего полного пробега на направление первоначальной скорости иона и его среднеквадратичное отклонение  $\Delta R_p$ . В литературе приведены рассчитанные значения  $R_p$  и  $\Delta R_p$  для различных атомов при различных значениях энергии. При моделировании технологии производства в качестве акцепторной примеси выбраны ионы бора, а в качестве донорной – мышьяка, соотношение  $E$ ,  $R_p$  и  $\Delta R_p$  для данных ионов приведено в таблице 1 [11].

Таблица 1 – Соответствие энергии ионов  $R_p$  и  $\Delta R$

Е, кэВ		$R_p$ , нм	$\Delta R_p$ , нм
20	B	78	32
	As	16	3,7
40	B	161	54
	As	27	6,2
60	B	244	71
	As	38	8,4
80	B	324	84
	As	48	10,5
100	B	398	94
	As	58	12,5
120	B	469	102
	As	68	14,5
140	B	537	110
	As	79	16
160	B	603	116
	As	89	18
180	B	665	121
	As	99	20
200	B	725	126
	As	110	22

Величина  $R_p$  иона рассчитывается в соответствии со следующим выражением [11]:

$$R_p = \frac{X_j}{1 + \frac{\sqrt{4,6 \cdot \log\left(\frac{C_{\max}}{C_b}\right) \cdot \gamma}}{3}}, \quad (1)$$

где  $X_j$  - глубина, на которую необходимо имплантировать атомы,  $C_{\max}$  - максимальная концентрация примеси,  $C_b$  - концентрация примеси в материале мишени,  $\gamma$  - коэффициент передачи ионом максимально возможной энергии, определяется выражением:

$$\gamma = \frac{4 \cdot M_1 \cdot M_2}{(M_1 + M_2)^2}, \quad (2)$$

где  $M_1$  - масса атома примеси,  $M_2$  - масса атома мишени.

Доза облучения определяется согласно выражению [11]:

$$Q = 2,5 \cdot \Delta R_p \cdot C_{\max}. \quad (3)$$

Параметрами диффузии являются: температура и время. Известна зависимость коэффициентов диффузии различных примесей в кремнии от температуры (см. рисунок 13) [11], что позволяет при известной температуре проведения диффузии определить коэффициент диффузии.

Это позволяет рассчитать время, которое необходимо для проведения диффузии, при известной температуре следующим образом [11]:

$$D \cdot t = \frac{X^2}{4 \cdot \ln\left(\frac{C_0}{C_B}\right)}, \quad (4)$$

где  $X$  - глубина залегания р-п перехода;

$C_B$  - концентрация примеси в исходной пластине полупроводника;

$C_0$  - поверхностная концентрация примеси.

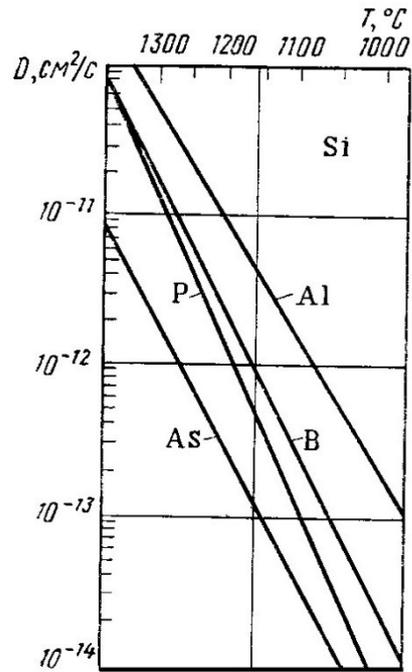


Рисунок 13 - Зависимость коэффициентов диффузии примесей в кремнии от температуры

При последовательных двух диффузиях акцепторных и донорных примесей:

$$D^d \cdot t^d = \left( \frac{4 \cdot \ln \left( \frac{C_0^d}{C_B} \right)}{X^2} + \frac{1}{D^a \cdot t^a} \right)^{-1} \quad (5)$$

В выражении верхние индексы обозначают тип примеси:  $d$  – донорная,  $a$  – акцепторная.

7. Удаление островков изолятора над  $p^+$ -областями и нанесение на всю планарную поверхность слоя  $\text{SiO}_2$  [1 - 3]. Вытравливание в межслойном изоляторе методом фотолитографии контактных окон над  $p^+$  и  $n^+$  истоковыми областями отдельных транзисторных ячеек (см. рисунок 14) [1 - 3].

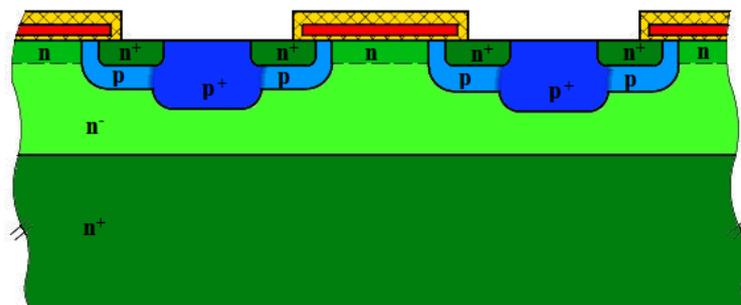


Рисунок 14 – Формирование надзатворного диэлектрика

8. Напыление алюминия и формирование из него фотолитографией электрода истока и периферийного противоканального металлического электрода на планарной поверхности структуры. Формирование многослойного (хром, никель, золото или титан, никель серебро) омического контакта стока на непланарной стороне (см. рисунок 15) [1 - 3];

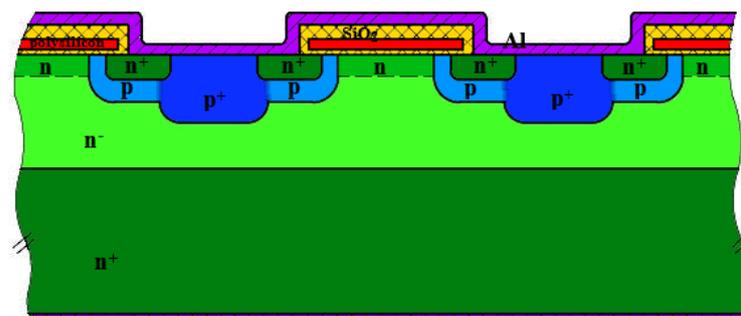


Рисунок 15 – Формирование электродов

Рассмотренные этапы данной технологии и будут воспроизводиться для восстановления структуры прибора при помощи технологического моделирования в п. 4.2.

1.2 Физика радиационного воздействия в полупроводниковых приборах и особенности радиационных эффектов, возникающих в ДМОП-транзисторе при воздействии импульсного гамма-излучения

Различная по природе возникновения проникающая радиация имеет две основные формы: электромагнитное излучение (гамма- и рентгеновское излучение) и излучение частиц (электроны, ионы, нейтроны), влияние каждого из которых приводит к изменениям в работе полупроводниковых приборов, вплоть до отказов. В настоящей работе рассматривалось ионизирующее излучение ядерного взрыва, в качестве воздействующего фактора - импульсное гамма-излучение. Построение модели реакции полупроводникового прибора на воздействие импульсного гамма-излучения представляет особый интерес ввиду того, что при ядерном взрыве импульс гамма-излучения опережает во времени нейтронный импульс (это происходит потому что гамма-кванты распространяются со скоростью света, а нейтроны являются нерелятивистскими) [12, 13]. Поэтому к моменту воздействия нейтронного импульса работа электроники может быть нарушена влиянием импульсного гамма-излучения. Такое нарушение необходимо предсказывать при разработке электронных схем. Поэтому рассмотрение реакции полупроводникового прибора на импульсное гамма-излучение является актуальной задачей.

Ионизация твердого тела в результате взаимодействия с материалом гамма-квантов происходит посредством трех различных процессов: фотоэлектрического эффекта, эффекта Комптона и образования электронно-позитронных пар (см. рисунок 16). Основным результатом для каждого из этих эффектов является образование энергетичных вторичных электронов [14 - 17].

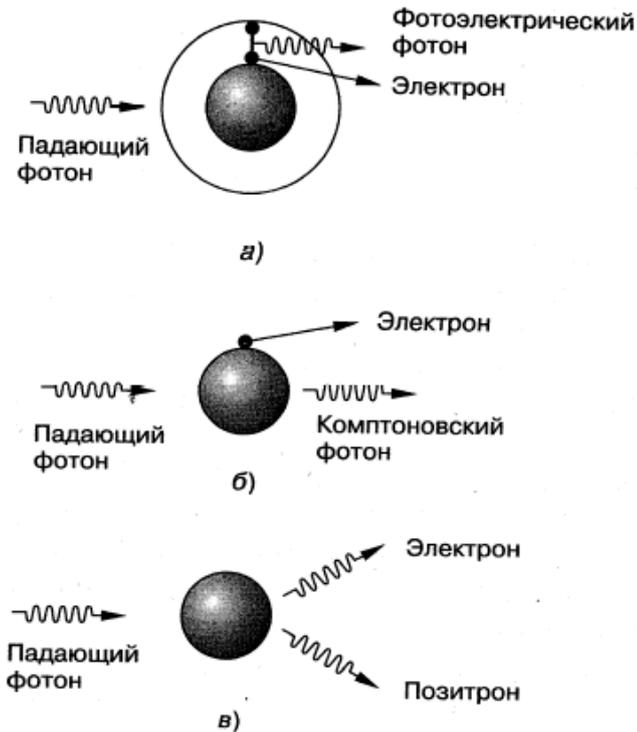


Рисунок 16 – Механизмы взаимодействия фотонов с материалом:  
а – фотоэлектрический эффект; б – эффект Комптона; в – образование пар

При взаимодействии с материалом низкоэнергетических фотонов происходит фотоэлектрический эффект (см. рисунок 16а), представляющий собой процесс поглощения гамма-кванта атомами вещества. Энергия гамма-кванта передаётся одному из электронов атома. Чаще всего им оказывается наиболее близкий к ядру К-электрон. Этот электрон вылетает с энергией, равной разности энергий гамма-кванта и энергии связи рассматриваемого электрона в атоме. Таким образом, в результате фотоэлектрического эффекта образуются свободные электроны (фотоэлектроны) и ионизированные атомы. Кроме того, поскольку испускается фотоэлектрон, электрон на внешней оболочке атома «падает» на место, освобожденное фотоэлектроном, в результате чего испускается низкоэнергетический фотон. В общем случае, низкоэнергетический фотон не обладает энергией, достаточной для образования дополнительной электронно-дырочной пары, но, в зависимости от энергии падающего фотона, испускаемый

электрон может генерировать многочисленные дополнительные электронно-дырочные пары [14 - 17].

При облучении материалов высокоэнергетическими фотонами доминирует процесс комптоновского рассеяния (см. рисунок 16б), при котором гамма-квант в процессе взаимодействия с электроном может рассеяться на некоторый угол  $\theta$ , передав ему часть своей энергии. В этом случае гамма-кванты не только меняют направление импульса, но и его величину, т.е. происходит изменение энергии, а это значит частоты гамма-квантов. При взаимодействии высокоэнергетического фотона с атомом часть его энергии передается электрону атома мишени, в результате чего энергия электрона становится достаточной для того, чтобы он покинул атом мишени. Он также может создать свободный электрон и ионизированный атом [14 - 17].

Образование электронно-позитронных пар имеет место только для очень высокоэнергетических фотонов ( $E > 3 \text{ МэВ}$ ) (см. рисунок 16в). При образовании пар падающий фотон сталкивается с атомом мишени, образуя электронно-позитронную пару. При образовании пары падающий фотон полностью уничтожается.

Области энергий фотонов, при которых в зависимости от атомного номера мишени преобладает тот или иной процесс из рассмотренных выше, показаны на рисунке 17, при этом сплошные линии соответствуют равной вероятности возникновения двух различных эффектов [14].

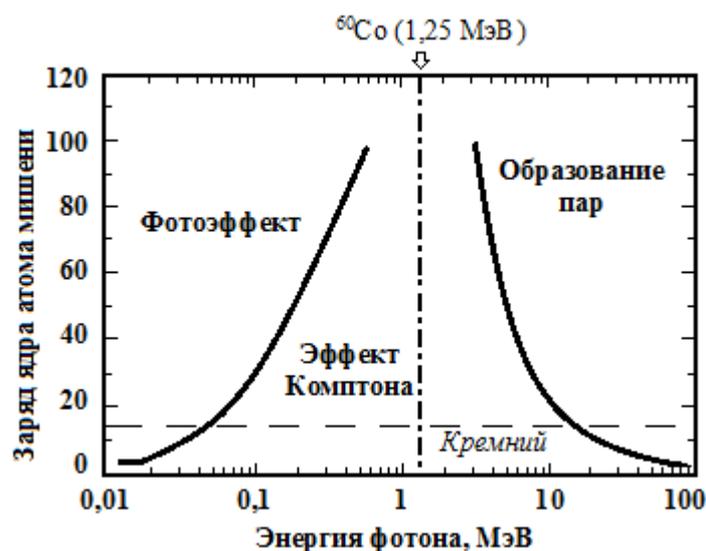


Рисунок 17 – Области преобладания механизмов взаимодействия фотонов с материалом в зависимости от энергии фотонов и заряда ядра атома мишени

Из рисунка 17 видно, что облучение кремниевых приборов гамма-излучением со спектральным распределением, главным образом, приводит к комптоновскому рассеянию, за исключением рентгеновских лучей, взаимодействующих посредством фотозффекта, и квантов с энергией более 20 МэВ, взаимодействие которых с кремнием приводит к образованию электрон-позитронных пар. Облучение кремния гамма-излучением изотопного источника  $^{60}\text{Co}$  с энергией 1,2 МэВ приводит только к комптоновскому рассеянию.

С точки зрения деградации параметров полупроводниковых приборов при взаимодействии гамма-излучения с материалами приборов возникающие радиационные эффекты подразделяют на эффекты смещения и ионизационные эффекты [14]. Каждый из указанных видов радиационных эффектов может быть как долговременным, так и кратковременным.

Эффекты смещения представляют собой перемещение атомов из своего нормального положения в кристаллической решетке материала, сопровождающееся появлением структурных дефектов [18]. Образование таких дефектов в объеме облучаемых полупроводниковых материалов ведет к изменению их электрофизических параметров, таких как время жизни, концентрация и подвижность неосновных носителей. Вследствие этого происходит изменение характеристик облучаемых полупроводниковых приборов и интегральных схем [18, 19]. Радиационные изменения параметров полупроводника при эффекте смещения зависят от вида радиации, энергии и дозы излучения [20]. Проявление эффектов смещения более характерно в случае воздействия излучения частиц (электронов, протонов, нейтронов, ТЗЧ). Вероятность возникновения смещенных атомов в результате непосредственного взаимодействия с  $\gamma$ -квантами очень мала. Основную роль в создании дефектов от гамма-излучения играют быстрые электроны, возникающие, главным образом, в результате эффекта Комптона [20]. Тем не менее, количество дефектов структуры, образованных таким образом, крайне мало. Кроме того, механизмы отказа при радиационном облучении, связанные с эффектами смещения, наиболее характерны для полупроводниковых приборов и интегральных схем, изготовленных по биполярной технологии, поскольку их основные характеристики определяются объемными свойствами полупроводниковых материалов [14]. Поэтому при рассмотрении в данной работе влияния гамма-излучения на работу МОП-транзистора данные эффекты не рассматривались.

Преобладающие механизмы отказов полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС), изготавливаемых по МОП-технологии, связаны с ионизационными эффектами [19]. Под ионизационными понимаются эффекты образования под действием ионизирующего излучения свободных носителей заряда, которые перемещаются по объему облучаемого материала и захватываются имеющимися там ловушками [14,18]. Ионизационные эффекты, образующиеся в результате воздействия гамма-излучения, подразделяются на поверхностные и объемные [19].

Поверхностные ионизационные эффекты в основном определяются накоплением зарядов в тонких слоях подзатворных диэлектриков, а также на границах раздела Si/SiO<sub>2</sub>. Данные эффекты являются доминирующими при воздействии стационарного ИИ. При импульсных воздействиях поверхностные эффекты могут проявляться в виде остаточных отказов, возникновение которых определяется величиной накопленной дозы. В большинстве полупроводниковых приборов и ИС, изготавливаемых по МОП-технологии, поверхностные эффекты практически не влияют на нарушение работоспособности во время действия импульса излучения, так как характерная величина поглощенной дозы за импульс при этом не превышает 10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup> рад, что не приводит к существенному изменению параметров рассматриваемых полупроводниковых приборов [19].

Объемные ионизационные эффекты связаны с процессами генерации, рекомбинации и переноса неравновесных носителей в активных областях подложки и полупроводниковых МОП-структур при воздействии импульсных ИИ. В неоднородных структурах, к которым относятся р-п переходы, барьеры Шоттки, паразитные биполярные транзисторы и др., основным эффектом является образование ионизационных токов. Эти токи имеют, как правило, обратимый характер [14]. Исключением являются случаи, когда амплитуды ионизационных токов превышают допустимые значения токов в рассматриваемых областях полупроводникового прибора. Образование подобных эффектов зависит от величины и локализации ионизационных токов, а также от типа облучаемого изделия. Кроме того, вследствие взаимного влияния областей происходит отпирание р-п переходов, образование вторичных ионизационных токов транзисторов и т.п. [19].

Кроме того, при прохождении высокоэнергетичного фотона через два смежных материала с различными атомными массами в материале с меньшей атомной массой количество сгенерированных электронов вблизи границы будет больше, чем при электронном равновесии, в результате чего значение поглощенной дозы будет выше равновесного значения [14]. При фотонном облучении величина дозового усиления будет наибольшей для низкоэнергетических (с энергией  $\ll 1$  МэВ) фотонов, которые взаимодействуют с материалом посредством фотоэлектрического эффекта. Количество вторичных электронов, генерируемых низкоэнергетическими фотонами, пропорционально  $Z^4$ . В МОП-транзисторах с поликремниевым затвором атомная масса кремния немного выше атомной массы диоксида кремния, и величина дозового усиления при облучении гамма-квантами незначительна [14, 19].

В случае неоднородного поглощения энергии импульсного ИИ (например, сверхжесткого рентгеновского излучения) имеют место термодинамические эффекты, выражающиеся в выделении тепла, вследствие разных коэффициентов теплового расширения материалов ИС. Данные эффекты могут приводить к отказам вследствие механического разрушения корпусов и кристаллов и зависят от конструктивного исполнения изделия [19].

### 1.2.1 Обратимые ионизационные эффекты

Как было показано выше, при воздействии ионизирующего излучения на электронный компонент в объеме всех его областей происходит генерация носителей заряда, что приводит к возможности протекания значительных токов в тех областях, в которых ранее это было невозможно – например, в диэлектрических слоях, либо в обратно смещённых р-n переходах. Вследствие этого эффекта изменяются токи, протекающие через контакты электронного компонента.

Ионизационный ток р-п перехода образуется в результате генерации электронно-дырочных пар при воздействии ионизирующего излучения. Такие эффекты связаны с воздействием импульсного гамма-излучения, характеризующегося определенным значением мощности экспозиционной дозы  $P_\gamma$ . Скорость генерации электронно-дырочных пар  $g(t)$  во время облучения импульсом гамма-излучения определяется следующим образом [18, 20]:

$$g(t) = g_0 \cdot P_\gamma(t), \quad (6)$$

где  $g_0$  - константа образования электронно-дырочных пар, для кремния  $g_0 = 4,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{рад}^{-1}$ .

При этом носители, образовавшиеся в области пространственного заряда, ускоряются электрическим полем перехода и собираются р и п областями практически сразу после начала облучения. Ток, вызванный движением этих носителей, не имеет временной задержки относительно импульса излучения и является мгновенной компонентой ионизационного тока  $I_{\text{мгн}}$  и может быть представлен в виде [18, 20]:

$$I_{\text{мгн}}(t) = q \cdot S_{p-n} \cdot l_{\text{об}} \cdot g(t), \quad (7)$$

где  $q$  – заряд электрона, Кл;

$S_{p-n}$  – площадь р-п перехода,  $\text{см}^2$ ;

$l_{\text{об}}$  – ширина обедненной области;

$g(t)$  – скорость генерации электронно-дырочных пар.

Носители заряда, образованные вне р-п перехода, приводят к увеличению концентрации неосновных носителей. При этом ток через переход постепенно увеличивается и затем поддерживается за счет носителей, генерируемых в объеме, ограниченном диффузионной длиной. Поскольку требуется определенное время, чтобы эти носители достигли р-п перехода, вызванный ими ток оказывается задержанным относительно импульса излучения.

Этот ток является запаздывающей компонентой ионизационного тока  $I_{\text{зап}}$  и может быть представлен в виде [20]:

$$I_{\text{зап}}(t) = q \cdot S_{p-n} \cdot \int_0^t g(t-z) \cdot \left( \frac{\sqrt{D_p} \cdot e^{-z/\tau_p} + \sqrt{D_n} \cdot e^{-z/\tau_n}}{\sqrt{\pi \cdot z}} \right) dz, \quad (8)$$

где  $D_p$  и  $D_n$  – коэффициенты диффузии неосновных носителей зарядов в p и n областях соответственно, см<sup>2</sup>/с;

$\tau_p$  и  $\tau_n$  – времена жизни неосновных носителей зарядов в p и n областях соответственно, с.

Обе компоненты ионизационного тока, складываясь, увеличивают начальный обратный ток через переход на время, определяемое длительностью импульса излучения и временем восстановления равновесного состояния. Таким образом, полный ионизационный ток p-n перехода  $I_{\text{ион}}$  определяется выражением:

$$\begin{aligned} I_{\text{ион}}(t) &= I_{\text{МГН}}(t) + I_{\text{зап}}(t) = \\ &= q \cdot S_{p-n} \cdot \left( l_{\text{об}} \cdot g(t) + \int_0^t g(t-z) \cdot \left( \frac{\sqrt{D_p} \cdot e^{-z/\tau_p} + \sqrt{D_n} \cdot e^{-z/\tau_n}}{\sqrt{\pi \cdot z}} \right) dz \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Амплитуда и временная зависимость ионизационного тока будут определяться характеристиками ионизирующего излучения, напряжением, приложенным к p-n переходу, а также параметрами полупроводниковой структуры.

К обратимым ионизационным эффектам, образованным в результате облучения гамма-излучением, можно отнести, например, возникновение в выходных цепях импульсных сигналов помех, что может привести к сбоям в работе радиоэлектронной аппаратуры, изменению логического состояния цифровых интегральных схем (триггеров, регистров, ячеек памяти и т.п.) [14].

### 1.2.2 Необратимые ионизационные эффекты

К необратимым ионизационным эффектам, которые могут развиваться в МОП-транзисторах, можно отнести пробой подзатворного диэлектрика и вторичный пробой [14]. Пробой подзатворного диэлектрика определяется свойствами структуры Si/SiO<sub>2</sub> в результате воздействия гамма-излучения, а именно, накоплением заряда в диэлектрике и на границе раздела полупроводник-диэлектрик в результате облучения. Вследствие этого изменяется пороговое напряжение МОП-транзисторов и возрастают токи утечки транзисторов в закрытом состоянии. Данные эффекты вносят существенный вклад при воздействии гамма-излучения с экспозиционной дозой  $\sim 10^5$  Р и более. При рассмотрении импульсного излучения такое значение дозы будет получено в импульсах гамма-излучения с мощностью дозы порядка  $10^{12}$  Р/с. Воздействие такого импульса само по себе приведет к нарушению в работе полупроводникового прибора. Так как значимые изменения в работе приборов исследуемого в работе типа наблюдаются при воздействии импульса гамма-излучения со значениями мощности экспозиционной дозы начиная с  $10^{11}$  Р/с, то при рассмотрении влияния импульсного гамма-излучения данный эффект не рассматривается ввиду малости по сравнению с обратимыми эффектами, наблюдаемыми при указанных уровнях мощности экспозиционной дозы.

В структуре мощного вертикального МОП-транзистора имеется чередование слоев, образующих паразитную биполярную структуру (см. рисунок 18): базой паразитного биполярного транзистора является р-область МОП-транзистора, в которой образуется канал,  $n^+$ -исток МОП-транзистора – эмиттером, а дрейфовая  $n^-$ -область в стоке – коллектором [1]. При воздействии импульса гамма-излучения такая паразитная структура может усиливать появляющиеся в структуре прибора радиационные эффекты и приводить к возникновению вторичного пробоя и последующему катастрофическому отказу транзистора.

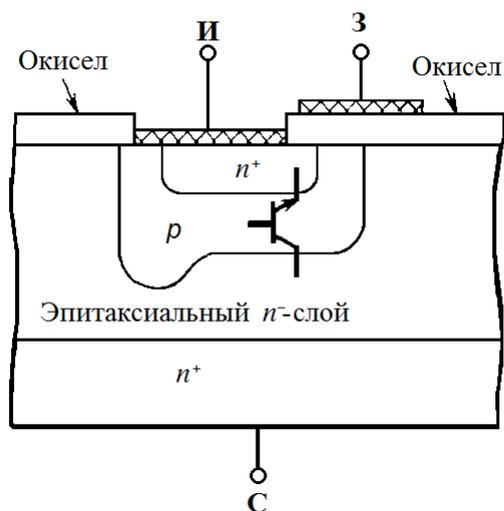


Рисунок 18 – Паразитный биполярный транзистор в структуре мощного вертикального МОП-транзистора

Так как возникновение паразитного биполярного транзистора во многом определяется структурой МОП-транзистора, то при разработке технологии изготовления применяются определенные методы борьбы с данным эффектом. Основные существующие методы рассмотрены в п. 1.1.1

### 1.3 Методы учета воздействия импульсного гамма-излучения в математических моделях

#### 1.3.1 Методы учета в SPICE-моделях влияния импульсного гамма-излучения на работу полупроводниковых приборов

Для проведения оценок работы электрических схем в условиях облучения ионизирующими излучениями обычно используют методы моделирования на основе эквивалентной схемы транзисторов и сводят задачу к решению системы уравнений Кирхгофа [21 - 23]. При этом полупроводниковые приборы заменяются эквивалентными схемами различной степени детализации (SPICE-модели) [23 - 26]. Плюсом таких моделей является широкое их применение в программах схемотехнического моделирования. Для основных типов полупроводниковых приборов разработаны эквивалентные схемы, позволяющие учитывать дефектообразующее радиационное воздействие на полупроводниковые структуры путем изменения параметров элементов указанных схем замещения [23, 24, 27, 28]. При этом для учета ионизационных токов в эквивалентные схемы вводят дополнительные сопротивления и/или генераторы, параметры которых зависят от воздействующего фактора и времени [21 - 23]. Для учета необратимых изменений определяются параметры модели, зависящие от воздействующего фактора, и задаются в виде зависимостей от него [27 - 30].

Однако минусом данных моделей является тот факт, что все SPICE-модели являются только электрическим эквивалентом прибора и, в связи с этим, имеют узкую область применения. В частности, модель может описывать работу транзистора при поданных на контакты определенных значениях напряжений, а в случае подачи на контакты иных значений напряжений реакция транзистора изменится и перестанет описываться разработанной ранее моделью. Кроме того, использование такого метода для моделирования приборов новых конструкций осложняется отсутствием устоявшихся SPICE-моделей, а также

необходимостью определения параметров эквивалентной схемы, в том числе в момент радиационного воздействия.

Для исследуемого мощного вертикального ДМОП-транзистора отсутствует SPICE-модель, учитывающая влияние импульса гамма-излучения, поэтому для возможности проведения оценок работы данного транзистора в условиях облучения ионизирующими излучениями требуется разработать такую SPICE-модель.

### 1.3.2 Методы учета в физико-топологических моделях влияния импульсного гамма-излучения на работу полупроводниковых приборов

Физико-топологические модели, основанные на решении базовых уравнений физики полупроводников, наиболее полно описывают физические процессы, протекающие в приборе, и, как следствие, имеют преимущество перед SPICE-моделями при оценке реакции прибора на радиационное воздействие. Методы учета радиационного воздействия в указанном подходе известны [32 - 35]. При проведении физико-топологического моделирования авторы учитывают изменение параметров материала в результате облучения путем задания значений этих параметров в виде зависимостей от воздействующего фактора. В основном в работах рассмотрено изменение характеристик различных типов полупроводниковых приборов после облучения гамма-излучением. В работе [33] представлен учет в физико-топологических моделях электрофизических параметров полупроводниковых материалов, таких как подвижность и время жизни носителей, после облучения гамма-, нейтронного и протонного излучений. Однако авторами в данных работах не рассматривается изменение функционирования прибора *при* воздействии ионизирующего излучения, то есть в моделях учитываются только необратимые изменения. Кроме того, в качестве объекта исследований мощный вертикальный ДМОП-транзистор рассмотрен не был. В настоящей работе целью является разработать физико-топологическую модель мощного вертикального ДМОП-транзистора,

учитывающую изменения, происходящие в работе данного прибора в процессе облучения импульсным гамма-излучением.

Разработка физико-топологической модели в дальнейшем позволит уточнить разработанную ранее SPICE-модель исследуемого ДМОП-транзистора с учетом импульсного гамма-излучения. Подобный подход рассмотрен в работе [36], где физико-топологическое моделирование применено в комплексе со схемотехническим. Однако комплекс моделей, состоящий из технологического, физико-топологического и схемотехнического уровней моделирования для анализа радиационной стойкости транзисторов ранее не использовался.

### **Выводы по главе 1**

При разработке комбинированной модели реакции мощного вертикального ДМОП-транзистора на воздействие импульсного гамма-излучения следует свести влияние импульсного гамма-излучения к возникновению объемных ионизационных эффектов, а именно, ионизационных токов, связанных с процессами генерации, рекомбинации и переноса неравновесных носителей в активных областях МОП-структуры. При этом пренебречь:

- эффектами смещения. Так как их проявление более характерно в случае воздействия излучения частиц и механизмы отказа при радиационном облучении, связанные с эффектами смещения, наиболее характерны для полупроводниковых приборов и интегральных схем, изготовленных по биполярной технологии.

- поверхностными ионизационными эффектами. Так как данные эффекты являются доминирующими при воздействии стационарного ИИ, а при воздействии импульсного гамма-излучения характерная величина поглощенной дозы за импульс не превышает  $10^3$ - $10^4$  рад, что не приводит к существенному изменению параметров рассматриваемых полупроводниковых приборов.

- эффектом дозового усиления. Так как при воздействии гамма-излучения величина дозового усиления будет наибольшей для фотонов с энергией  $\ll 1$  МэВ, которые взаимодействуют с материалом посредством фотоэлектрического эффекта. Количество таких фотонов, воздействующих непосредственно на полупроводниковый прибор, мала вследствие поглощения таких фотонов элементами конструкции. Кроме того, в МОП-транзисторах с поликремниевым затвором атомная масса кремния немного выше атомной массы диоксида кремния, и величина дозового усиления при облучении гамма-квантами незначительна [14, 19].

- термодинамическими эффектами, выражающимися в выделении тепла, вследствие разных коэффициентов теплового расширения материалов ИС. Для рассматриваемого прибора величина разогрева незначительная, материалы конструкции прибора слабо отличаются друг от друга.

Комбинированная модель должна состоять из комплекса следующих типов моделей:

1. *SPICE-модель*: для возможности оценивать изменения в работе электрических схем, проектируемых с применением исследуемого типа прибора, во время импульса гамма-излучения. При этом с целью учета влияния импульсного гамма-излучения целесообразно использовать метод эквивалентных схем, добавляя в имеющуюся эквивалентную схему дополнительные источники тока, моделирующие протекание ионизационных токов. Минусом является тот факт, что все SPICE-модели являются только электрическим эквивалентом прибора и, в связи с этим, имеют узкую область применения. Для уточнения SPICE-модели исследуемого ДМОП-транзистора с учетом импульсного гамма-излучения целесообразно применять физико-топологическое моделирование.

2. *Физико-топологическая модель*: для проведения анализа изменения в работе рассматриваемой полупроводниковой структуры при воздействии импульсного гамма-излучения с возможностью получения параметров SPICE-модели с целью доработки (расширение области применения) последней.

Для разработки физико-топологической модели исследуемого транзистора необходимо как можно более точно задать его довольно сложную структуру, для чего обосновано применить технологическое моделирование.

3. *Технологическая модель:* с целью более корректного задания структуры. С этой целью следует решить обратную задачу, которая заключается в определении значений параметров технологии изготовления исследуемого транзистора по имеющимся в литературе данным о технологии с использованием экспериментальных данных о структуре и электрических характеристиках транзистора.

## Глава 2 Схемотехническая модель реакции ДМОП-транзистора на воздействие импульса гамма-излучения

Вторая глава посвящена вопросам разработки SPICE-модели ДМОП-транзистора с учетом воздействия на него импульсного гамма-излучения.

В п 2.1 кратко рассмотрена SPICE-модель МОП-транзистора без учета облучения, используемая в САПР электронных схем. Ввиду отсутствия библиотеки моделей электронных компонентов российского производства данная SPICE-модель была разработана сотрудниками ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина». Одной из целей данной работы являлась доработка модели для возможности учета в ней воздействия импульсного гамма-излучения.

В п 2.2 показана разработанная эквивалентная схема мощного ДМОП-транзистора, учитывающая воздействие импульсного гамма-излучения и лежащая в основе разрабатываемой SPICE-модели.

В п 2.3 приведено сравнение полученных в результате моделирования радиационно-наведенных напряжений на выводе истока транзистора при отсутствии управляющего напряжения на затворе и при питающем напряжении  $U_{си} = 5 \text{ В}$  при воздействии импульсного гамма-излучения со значениями мощности экспозиционной дозы  $P_\gamma = 5,8 \cdot 10^8 \text{ Р/с}$ ,  $7,4 \cdot 10^8 \text{ Р/с}$ ,  $1,2 \cdot 10^9 \text{ Р/с}$ . В результате сделан вывод о корректности модели ввиду хорошей корреляции результатов расчета с экспериментальными данными. Однако, как и все SPICE-модели, данная модель является только электрическим эквивалентом прибора и, в связи с этим, имеет узкую область применения. В частности, разработанная модель описывает работу транзистора при поданных на контакты определенных значениях напряжений, а в случае подачи на контакты иных значений напряжений реакция транзистора изменится и перестанет описываться разработанной ранее моделью. Благодаря наличию в литературе данных о чувствительности параметров полупроводниковых материалов к радиационному воздействию для уточнения параметров эквивалентной схемы без проведения эксперимента, лучше всего подходят физико-топологические модели.

Поэтому в дальнейшем SPICE-модель дорабатывалась при помощи *впервые* разработанной физико-топологической модели расчета транспорта электронов в структуре ДМОП-транзистора при воздействии импульса гамма-излучения.

В п 2.4 приведена методология интеграции разработанной SPICE-модели в существующую САПР электронных схем для удобства пользователя и сокращения временных затрат на проведение моделирования работы электрической схемы при помощи данной модели. Для этого предложено сохранение разработанной модели в качестве самостоятельного элемента библиотеки САПР.

## 2.1 SPICE-модель МОП-транзистора без учета облучения

Схемотехническое моделирование используется при разработке электронных схем с целью проведения анализа работы схемы при выбранных элементах схемы и с учетом примененных схемотехнических решений. При схемотехническом моделировании в качестве элементов схем используются SPICE-модели этих элементов, представляющие собой совокупность эквивалентной схемы и уравнений, описывающих работу данной схемы. Коэффициенты в уравнениях являются параметрами модели. В зависимости от степени детализации эквивалентной схемы такие модели могут описывать различное количество эффектов, реализующихся при работе полупроводникового прибора, и, как следствие, иметь различное количество параметров.

Для МОП-транзистора основными и наиболее простыми типами стандартных схемотехнических моделей являются:

LEVEL=1 – модель Шимана – Ходжеса; LEVEL=2 – модель MOS2;

LEVEL=3 – полуэмпирическая модель транзистора с малыми размерами (длиной канала  $L \leq 2$  мкм и шириной канала  $W \leq 2$  мкм) MOS3.

Так как в начале работы по созданию SPICE-модели отсутствовала информация о структуре исследуемого транзистора, то для первого приближения была выбрана наиболее простая модель первого уровня (LEVEL=1). Кроме того,

ввиду недостаточности приводимых в ТУ данных модель разрабатывалась путем модификации существующей SPICE-модели зарубежного аналога [31]. Для этого изменялись только основные параметры модели, такие как длина и ширина канала, пороговое напряжение, в то время как большинство параметров принималось теми же, что и в модели аналога [31]. Разработанная таким образом модель описывала экспериментальные данные для исследуемого транзистора, однако, достигалось данное соответствие заданием некоторой комбинации параметров, которая позволяла воспроизводить электрические характеристики, но при значениях параметров не соответствующих реальности, что было выяснено позднее после проведения экспериментальных исследований структуры транзистора, описанных в п. 4.1.

В результате проведения экспериментальных исследований структуры транзистора было определено, что исследуемый тип транзистора имеет канал длиной  $\sim 1$  мкм, поэтому было принято решение разработать SPICE-модель третьего уровня MOS3 [37]. Параметры такой модели делятся на электрические и технологические. При разработке модели технологические параметры, такие как длина  $L$  и ширина  $W$  канала, толщина подзатворного диэлектрика  $TOX$  задавались в соответствии с результатами экспериментальных данных о структуре транзистора, а некоторые параметры, такие как концентрация легирующей примеси  $NSUB$  в подложке, сопротивления стока  $RD$  и истока  $RS$  задавались в соответствии с результатами физико-топологического моделирования. На рисунке 19 представлена эквивалентная схема модели и обозначены:

$I_d$  – ток стока;  $I_{bs}$  – ток перехода подложка-исток;

$I_{bd}$  – ток перехода подложка-сток;  $C_{bd}$  – ёмкость подложка-сток;

$C_{gs}$  – ёмкость затвор-исток;  $C_{gd}$  – ёмкость затвор-сток;

$C_{gb}$  – ёмкость затвор-подложка;  $C_{bs}$  – ёмкость подложка-исток.

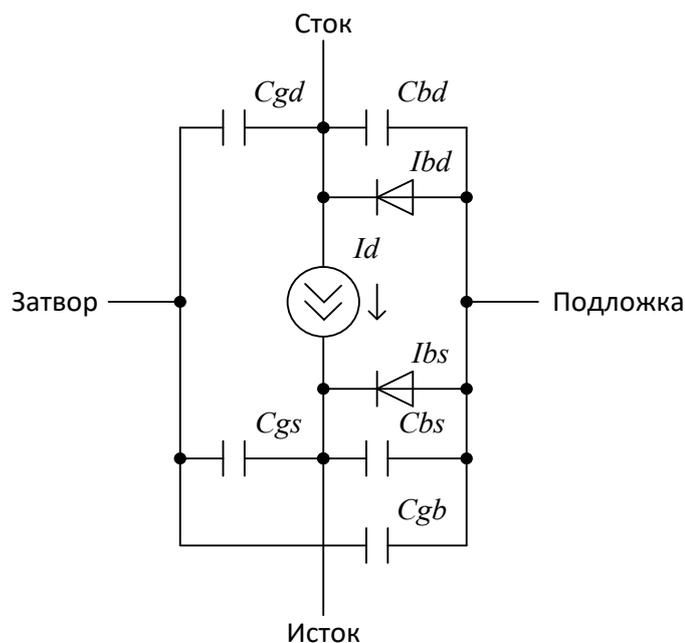


Рисунок 19 – Эквивалентная схема модели МОП-транзистора уровня 3 [37]

Все уравнения и параметры SPICE-модели МОП-транзистора подробно приведены в [37], ниже приводятся только основные.

#### 1) Пороговое напряжение

С уменьшением размеров прибора изменяется первоначальная зависимость порогового напряжения  $V_{TH}$ . Эта особенность моделируется при помощи разделения эффектов длины, ширины канала и статической обратной связи от стока к затвору. Каждая из этих особенностей задействуется при помощи задания параметров XJ, DELTA и ETA соответственно.

Выражение для  $V_{TH}$ , которое учитывает все эти особенности, выглядит следующим образом:

$$V_{TH} = \varphi_{MS} - \frac{q \cdot NSS}{C_{OX}} + 2\varphi_F - \sigma V_{DS} + \gamma F_S \sqrt{2\varphi_F - V_{BS}} + F_N (2\varphi_F - V_{BS}); \quad (10)$$

где  $\varphi_{MS}$  – разница в работах выхода из металла и полупроводника;

$q$  – заряд электрона;

$NSS$  – эффективная плотность поверхностного заряда;

$C_{OX}$  – емкость подзатворного диэлектрика;

$\varphi_F$  – уровень Ферми;

$\sigma$  – коэффициент статического отклика;

$$\sigma = ETA \frac{\Omega}{C_{ox}L^3}; \quad (11)$$

$\Omega$  – эмпирическая константа;  $\Omega = 8,15 \cdot 10^{-22}$ ;

$L$  – длина канала;

$ETA$  - параметр эффекта статической обратной связи;

$V_{DS}$  – напряжение сток-исток;

$\gamma$  - пороговый параметр подложки;

$F_s$  – корректирующий фактор эффекта короткого канала

$$F_s = 1 - \frac{XJ}{L} \left[ \frac{LD+W_C}{XJ} \sqrt{1 - \left( \frac{W_P/XJ}{1+W_P/XJ} \right)^2} - \frac{LD}{XJ} \right]; \quad (12)$$

где  $XJ$  - глубина металлизации перехода;

$LD$  – диффузионная длина в латеральном направлении,

$W_P$  – ширина обеднённой зоны планарного p-n перехода,

$W_C$  – ширина обеднённой зоны цилиндрического p-n перехода.

$V_{BS}$  – напряжение подложка-исток;

$F_N$  – корректирующий фактор эффекта узкого канала

$$F_N = DELTA \frac{\pi \epsilon_{Si}}{2C_{ox}W}, \quad (13)$$

где  $DELTA$  - коэффициент ширины канала;

$\epsilon_{Si}$  - диэлектрическая проницаемость кремния.

2) Основное уравнение тока стока

$$I_{DS} = \beta \int_0^{V_{DS}} [V_{GS} - V_{TH} - (1 - F_B)V_y] dV_y, \quad (14)$$

где  $\beta = \frac{W}{L} \mu_{EFF} C_{ox}$ ;

$$\mu_{EFF} = \frac{\mu_S}{1 + \frac{\mu_S}{1 + V_{MAX} \cdot L \cdot V_{DS}}}$$

$V_{MAX}$  - максимальная скорость перемещения носителей;

$\mu_S$  - поверхностная подвижность носителей заряда;

$V_{GS}$  – напряжение затвор-исток;

$F_B$  – разложение в ряд Тейлора коэффициента заряда подложки:

$$F_B = \frac{\gamma F_S}{4\sqrt{2\phi_F - V_{BS}}} + F_N.$$

Поверхностная подвижность носителей заряда в зависимости от напряжения на затворе вычисляется при помощи эмпирического уравнения:

$$\mu_S = \frac{U0}{1+THETA(V_{GS}-V_{TH})}, \quad (15)$$

где  $U0$  – поверхностная подвижность носителей;

THETA – эмпирический параметр модуляции подвижности.

После интегрирования получаем уравнение:

$$I_{DS} = \beta \left[ V_{GS} - V_{TH} - \frac{1+F_B}{2} V_{DS} \right] V_{DS}. \quad (16)$$

3) Напряжение насыщения устройства с коротким каналом  $V_{DSAT}$  – это напряжение стока, при котором носители стремятся достигнуть максимальной скорости.  $V_{DSAT}$  определяется согласно выражению:

$$V_{DSAT} = \frac{V_{GS}-V_{TH}}{1+F_B} + \frac{V_{MAX}\cdot L}{\mu_S} \sqrt{\left[ \frac{V_{GS}-V_{TH}}{1+F_B} \right]^2 + \left[ \frac{V_{MAX}\cdot L}{\mu_S} \right]^2}; \quad (17)$$

Если параметр  $V_{MAX}$  не задан, напряжение насыщения будет определяться уравнением:

$$V_{DSAT} = \frac{V_{GS}-V_{TH}}{1+F_B}. \quad (18)$$

Модель типа MOS3 имеет 35 параметров, представленных в таблице 2. В таблице приведены как значения параметров модели по умолчанию, так и полученные в результате экстракции, которые в дальнейшем использовались в качестве параметров модели исследуемого транзистора.

Таблица 2 – Параметры модели МОП-транзистора

Параметр	Определение	Значение по умолчанию	Задаваемые значения
Геометрия устройства			
L	Длина канала	$10^{-4}$ м	$10^{-6}$ м
W	Ширина канала	$10^{-4}$ м	5,2 м
AD	Площадь стока	0 м <sup>2</sup>	
AS	Площадь истока	0 м <sup>2</sup>	
NRD		1	
NRS		1	
PD	Периметр стока	0 м	
PS	Периметр истока	0 м	
Пороговая связь			
NFS	Эффективная плотность быстрых поверхностных заряда ЯЧ	0 см <sup>2</sup>	$10^{-13}$ см <sup>2</sup>
NSS	Эффективная плотность поверхностного заряда	0 см <sup>2</sup>	
NSUB	Концентрация легирующей смеси в подложке	$10^{15}$ см <sup>-3</sup>	$10^{17}$ см <sup>-3</sup>
DELTA	Коэффициент ширины канала	0	
ETA	Параметр эффекта статической обратной связи	0	
GAMMA	Пороговый параметр подложки	0 В <sup>1/2</sup>	1,55 В <sup>1/2</sup>

Продолжение таблицы 2

Параметр	Определение	Значение по умолчанию	Задаваемые значения
VTO	Пороговое напряжение при нулевом смещении	0 В	2,94 В
Электрические процессы			
IS	Обратный ток стокового или истокового переходов	$10^{-16}$ А	$8 \cdot 10^{-7}$ А
JS	Плотность обратного тока стокового или истокового переходов	$10^{-4}$ А/м <sup>2</sup>	
RD	Омическое сопротивление стока	0 Ом	0,02 Ом
RS	Омическое сопротивление истока	0 Ом	0,0165 Ом
UO	Поверхностная подвижность при низких напряжениях затвора	600 см <sup>2</sup> /(В·с)	710 см <sup>2</sup> /(В·с)
VMAX	Максимальная скорость перемещения носителей	$0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$1,9 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Емкости			
CGBO	Емкость перекрытия затвор-подложка на метр ширины	0 Ф/м	
CGDO	Емкость перекрытия затвор-сток на метр ширины канала	0 Ф/м	
MJSW	Коэффициент градуировки боковой стенки p-n перехода	0,33	
PB	Потенциал перехода подложки	0,8 В	
FC	Коэффициент емкости неидеального перехода с прямым смещением	0,5	

Продолжение таблицы 2

Параметр	Определение	Значение по умолчанию	Задаваемые значения
Физические процессы			
LD	Коэффициент боковой диффузии	0 м	$4 \cdot 10^{-9}$ м
TOX	Толщина оксидного слоя	100 нм	35 нм
TRG	Тип затвора	1	-1
WD	Ширина стока	0 м	
XJ	Глубина металлизации перехода	0 м	$2 \cdot 10^{-7}$ м
KP	Параметр внутренней активной проводимости	0 А/В <sup>2</sup>	
RNI	Поверхностный потенциал при сильной инверсии	0 В	0,085 В
THETA	Эмпирический параметр модуляции подвижности	0 В <sup>-1</sup>	

Модель строилась по экспериментальным данным для выборки транзисторов объёмом 20 штук, полученным в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина».

Передаточные характеристики транзистора показывают, как ведёт себя выходной ток в зависимости от управляющего сигнала. В МОП-транзисторе управляющим сигналом является напряжение затвора ( $U_{зи}$ ). Зависимость тока стока ( $I_c$ ) от напряжения затвор-исток ( $U_{зи}$ ) при постоянном напряжении сток-исток ( $U_{си}$ ) является передаточной характеристикой. На рисунке 20 показаны границы массива передаточных характеристик, полученных при  $U_{си} = 5$  В.

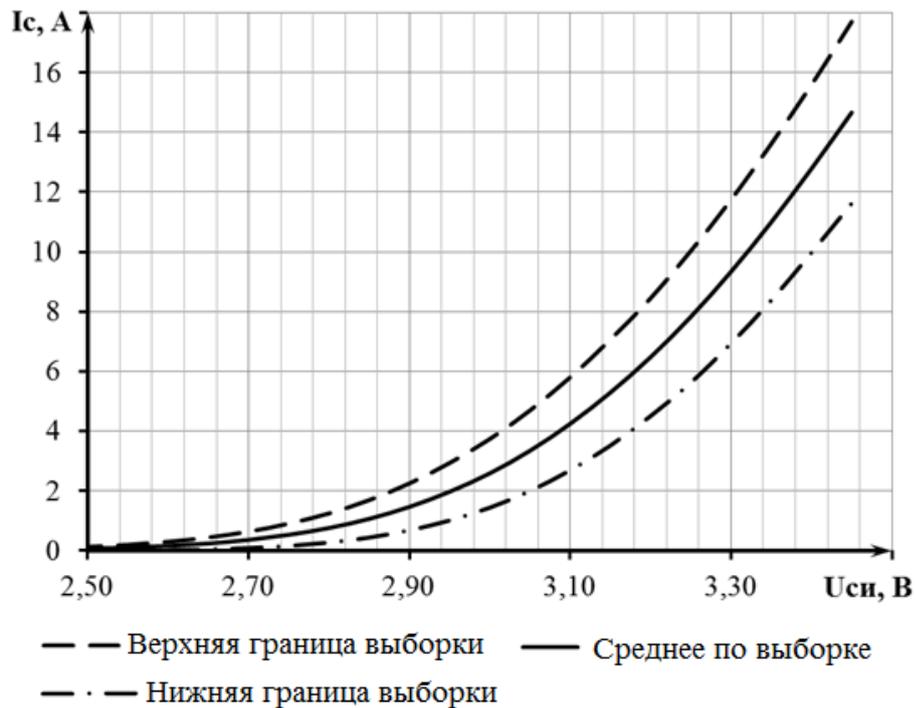


Рисунок 20 – Передаточная характеристика МОП-транзистора при  $U_{зи} = 5 \text{ В}$

*Выходные характеристики* показывают как ведёт себя ток стока ( $I_C$ ) в зависимости от напряжения стока ( $U_C$ ). Зависимость тока стока ( $I_C$ ) от напряжения сток-исток ( $U_{си}$ ) при постоянном напряжении затвор-исток ( $U_{зи}$ ) является выходной характеристикой. На рисунке 21 представлены границы массива выходных характеристик, полученных при  $U_{зи} = 3 \text{ В}$ .

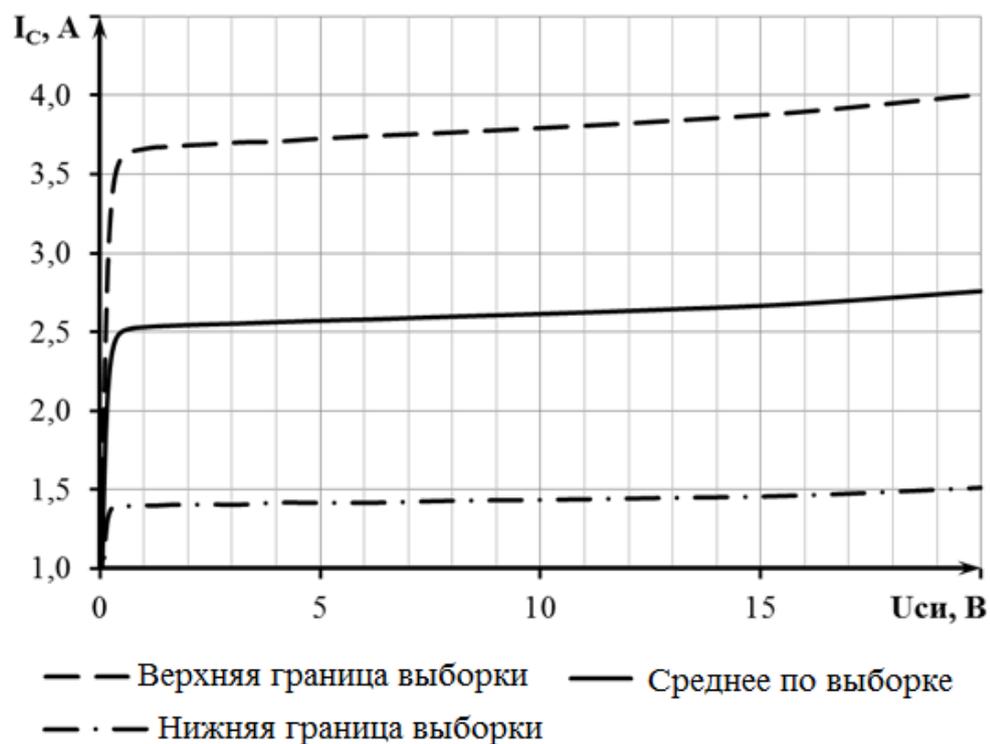


Рисунок 21 – Выходные характеристики МОП-транзистора при  $U_{зи} = 3,0$  В

Для определения образца, по которому проводилась экстракция параметров, с помощью метода наименьших квадратов было рассчитано отклонение относительно среднего по выборке. Результаты приведены в таблице 2, из которой видно, что наиболее близким к среднему является образец №6.

Таблица 2 – Отклонение относительно среднего по выборке, %

		№ образца																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Семейство передаточных ВАХ	$U_{зи}=5 В$	94	187	14	720	225	<u>5</u>	31	144	34	64	9	42	75	169	120	36	62	10	40	94
	$U_{зи}=10 В$	72	365	13	849	219	<u>6</u>	32	186	35	135	11	89	96	219	164	64	92	10	35	72
	$U_{зи}=20 В$	85	193	10	673	228	<u>5</u>	31	124	32	65	7	52	75	156	136	32	88	13	38	85
Семейство выходных ВАХ	$U_{си}=3,0 В$	3	10	7	83	92	4	18	13	7	11	5	<u>1</u>	2	23	12	2	29	7	6	3
	$U_{си}=3,1 В$	10	27	10	178	148	6	27	26	14	21	7	<u>3</u>	8	46	27	4	49	10	12	10
	$U_{си}=3,2 В$	23	57	12	323	199	<u>6</u>	33	48	21	36	8	12	21	76	52	10	67	14	19	23
	$U_{си}=3,3 В$	48	118	11	520	217	<u>5</u>	33	79	30	52	9	31	45	114	88	19	81	12	27	48
	$U_{си}=3,4 В$	82	197	8	680	215	<u>1</u>	29	120	39	74	8	51	69	149	127	30	74	9	33	82

С помощью САПР создания SPICE-моделей были экстрактированы параметры модели MOS3 для соответствия приведённым выше экспериментальным данным. Процесс экстракции представляет собой многоитерационный процесс перебора параметров модели для подгона ВАХ, полученных при моделировании, ВАХ, полученным экспериментально.

В ходе экстракции в результате поочередного перебора значений параметров была получена следующая модель:

```
.MODEL MOSFET NMOS
+ LEVEL = 3
+ UO = 710
+ VTO = 2.94
+ NFS = 1E-13
+ TOX = 3.5E-08
+ NSUB = 1E+17
+ NSS = 0
+ VMAX = 1.9E+05
+ RS = 0.0165
+ RD = 0.02
+ RSH = 0
+ CBD = 0
+ CBS = 0
+ CJ = 0
+ MJ = 0.5
+ CJSW = 0.33
+ IS = 8E-07
+ PB = 0.8
+ FC = 0.5
+ XJ = 2E-07
+ LD = 4E-09
+ DELTA = 0
+ THETA = 0
+ ETA = 0
+ KAPPA = 0
+ GAMMA = 1.55
+ PHI = 0.085
```

2.2 Доработка встроенной SPICE-модели МОП-транзистора для возможности учета влияния импульсного гамма-излучения на работу прибора

Для учета импульсного гамма-излучения в SPICE-модели мощного вертикального МОП-транзистора необходимо доработать используемую стандартную эквивалентную схему прибора на основе известных данных об эффектах, возникающих в приборе при воздействии такого типа излучения. В п. 1.2.1 показано, что при воздействии импульсного гамма-излучения происходит ионизация материала, в результате чего возникают ионизационные токи в р-п переходах, образованных в структуре данного прибора.

При моделировании протекание ионизационных токов можно реализовать путем введения в эквивалентную схему дополнительных генераторов тока, ток каждого из таких генераторов имитирует ионизационный ток р-п перехода. В первой версии SPICE-модели исследуемого транзистора [31] моделировались ионизационные токи  $I_{зс}$ ,  $I_{зи}$ ,  $I_{ис}$ , для чего при доработке эквивалентной схемы использовались три генератора токов, зависящих от мощности дозы гамма-излучения (см. рисунок 22). Для подключения генераторов к внутренним узлам транзистора значения внутренних сопротивлений модели транзистора были установлены равными нулю, а для учета этих сопротивлений были подключены внешние резисторы  $R_z$ ,  $R_c$  и  $R_u$ .

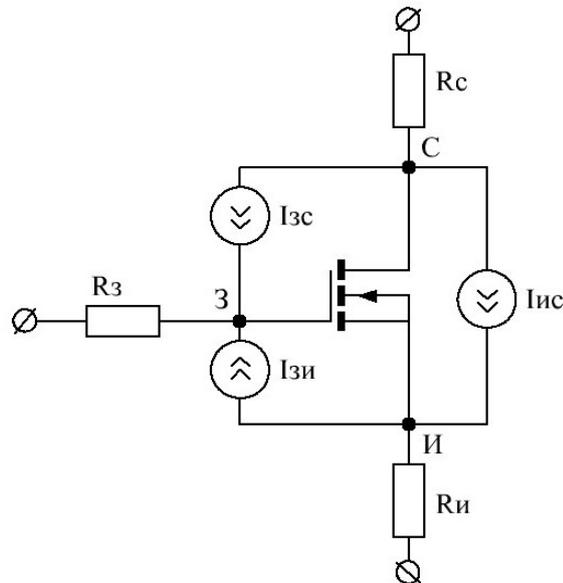


Рисунок 22 – Эквивалентная схема полевого транзистора с учетом ионизационных эффектов.

В целом такая упрощенная модель позволяла описывать амплитуды наведенного потенциала на закороченных стоке и истоке транзистора от мощности дозы при отсутствии напряжений на затворе и стоке (см. рисунок 23).

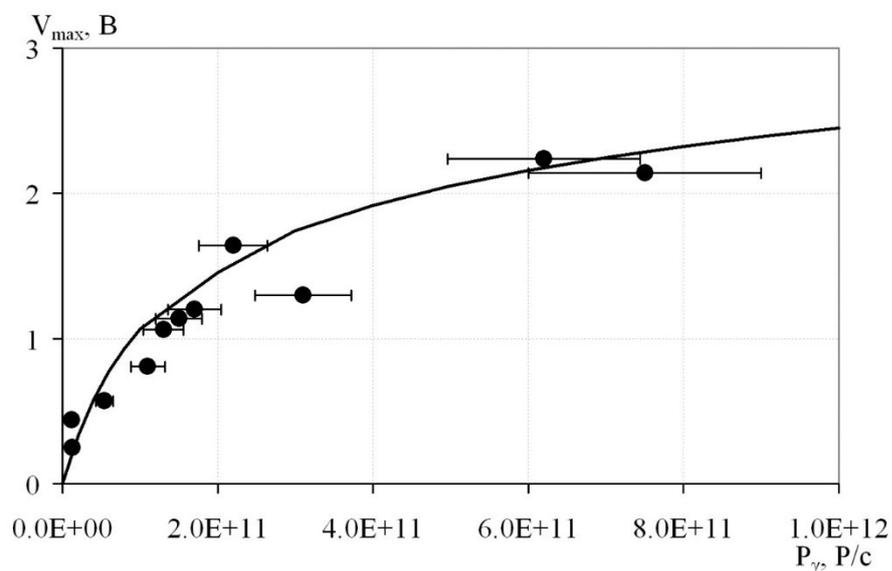


Рисунок 23 – Зависимость амплитуды наведенного потенциала от мощности дозы: ● - результаты экспериментов; сплошная линия – результаты моделирования.

При этом временные зависимости наведенного потенциала на истоке транзистора при отсутствии напряжения питания ( $U_3=0$ ,  $U_c=0$ ) выглядели как показано на рисунке 24.

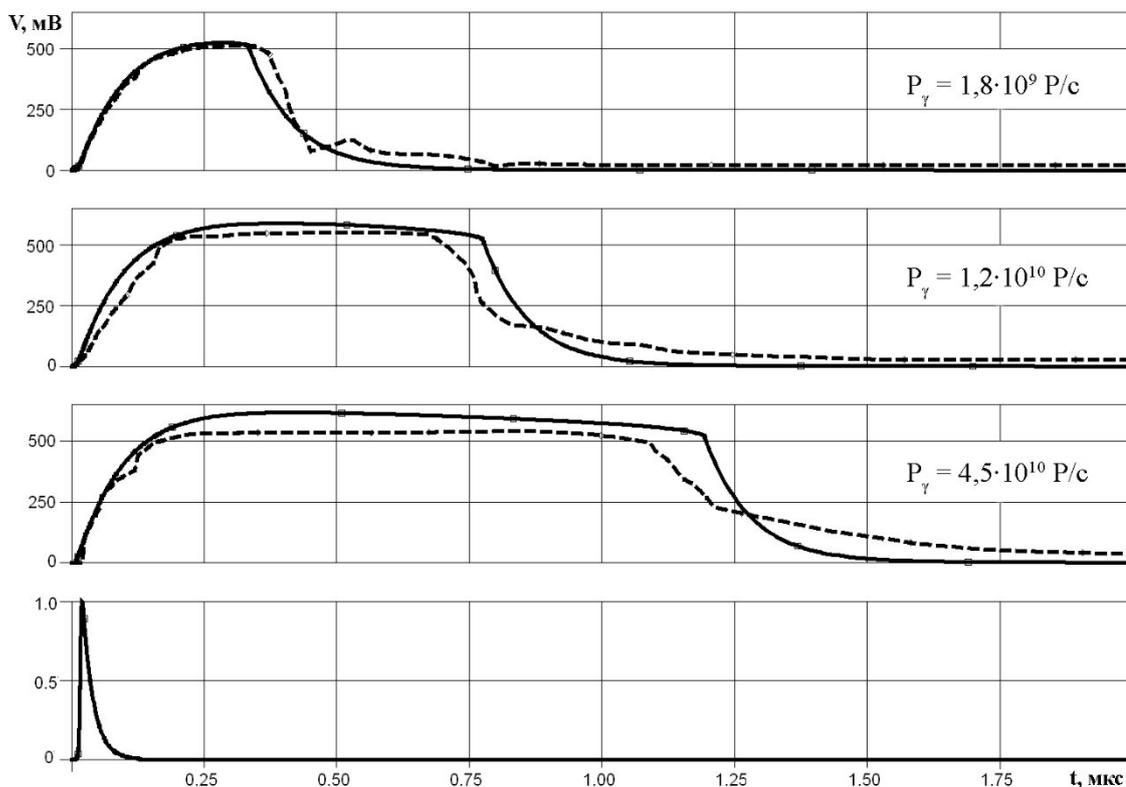


Рисунок 24 – Радиационно-наведенный потенциал на истоке транзистора при отсутствии напряжения питания и различных значениях мощности дозы: сплошная линия - результаты моделирования; пунктир – экспериментальные данные; нижняя кривая представляет собой единичную форму импульса гамма-излучения.

Однако при подаче отличных от нуля напряжений, например, питающего  $U_c=23$  В при  $U_3=0$  описание моделью отклика транзистора нарушается (см. рисунок 25).

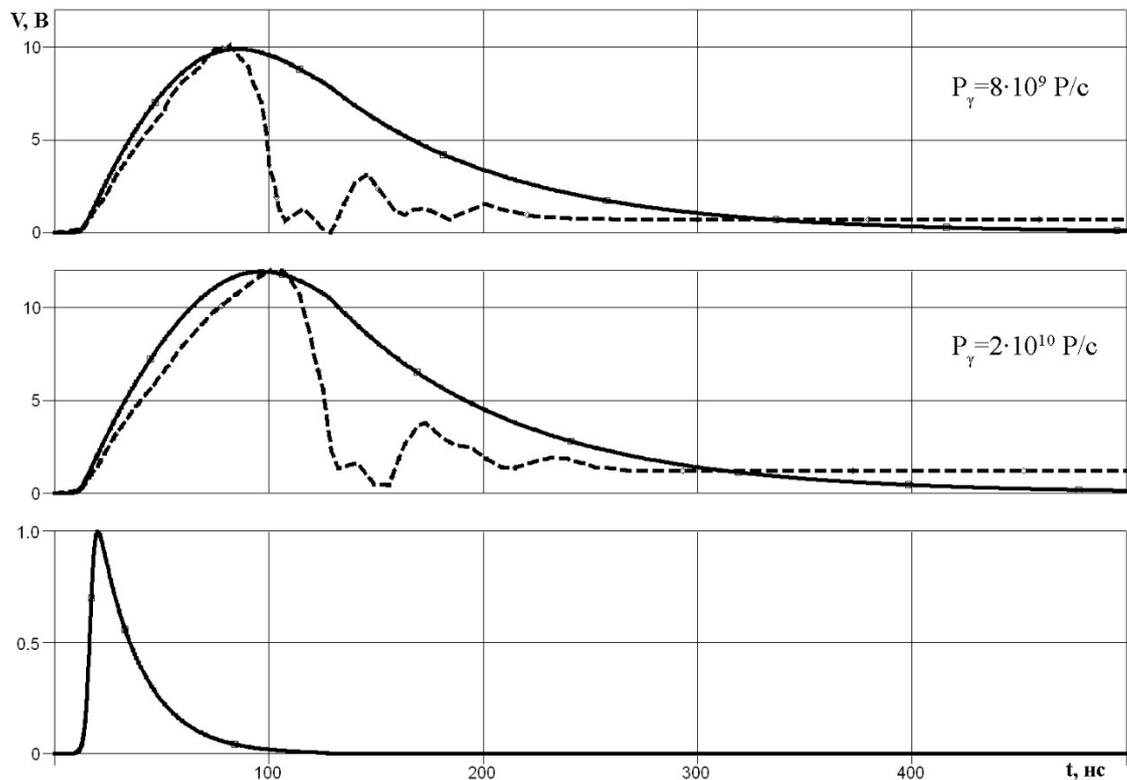


Рисунок 25 – Радиационно-наведенный потенциал на истоке транзистора при  $U_3=0$  В,  $U_c=23$  В и различных значениях мощности дозы: сплошная линия - результаты моделирования; пунктир – экспериментальные данные; нижняя кривая представляет собой единичную форму импульса гамма-излучения.

Этот результат иллюстрирует основной недостаток SPICE-моделей: при изменении напряжений, подаваемых на контакты прибора модель требует корректировки. Еще одним недостатком данного подхода является большое количество параметров, которые необходимо подбирать, для соответствия экспериментальным данным. При этом известно, что чем большим числом параметров определяется модель, тем проще добиться соответствия экспериментальным данным. Поэтому потребовалось доработка модели с целью определения необходимого и достаточного количества генераторов, вводимых в эквивалентную схему, а также определения параметров данных генераторов.

При доработке SPICE-модели, показанной в п. 2.1, было определено, что ионизационными токами  $I_{зс}$ ,  $I_{зи}$  можно пренебречь и для описания работы

исследуемого типа транзистора при воздействии импульсного гамма-излучения достаточно ввести в эквивалентную схему генератор тока, моделирующий протекание ионизационного тока  $I_{ис}$ . При этом из рисунка 26 видно, что в структуре вертикального МОП-транзистора присутствуют два р-n перехода:  $n^+$ -р переход исток-подложка и  $p$ - $n^-$  переход подложка-область дрейфа в стоке. Таким образом, токи транзистора, возникающие при воздействии импульсного гамма-излучения, будут зависеть от ионизационных токов указанных р-n переходов.

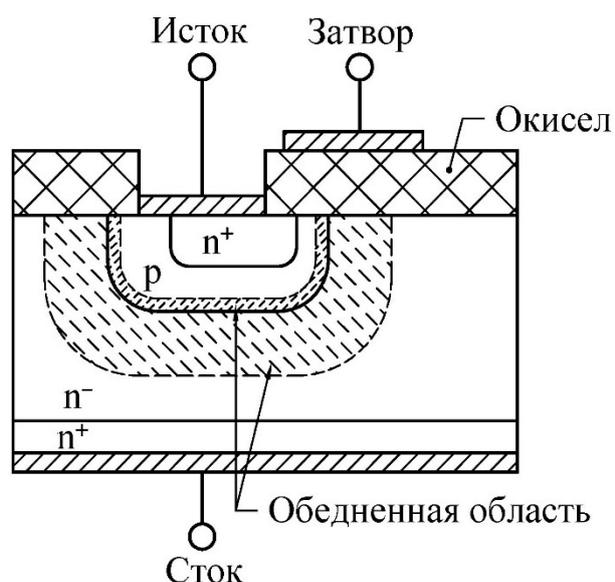


Рисунок 26 – Структура вертикального МОП-транзистора

Однако переход исток-подложка имеет меньшую площадь, чем переход подложка-область дрейфа в стоке, а, согласно формуле (9) (см. в п. 1.2.1), ионизационный ток перехода пропорционален его площади. При помощи физико-топологического моделирования показано, что наибольшее влияние облучение оказывает на переход  $p$ - $n^-$  область дрейфа в стоке, именно реакция этого перехода в основном будет определяет реакцию всего транзистора на облучение (см. рисунок 42). Таким образом, ионизационным током через переход подложка-исток ( $I_{ип}$ ) можно пренебречь. Кроме того, переход исток-подложка шунтирован через общую металлизацию истока и подложки. При уточнении SPICE - модели данный вывод позволил

ограничиться учетом в эквивалентную схему только ионизационного тока в переходе подложка – область дрейфа в стоке  $I_{пс}$ .

Переход подложка-область дрейфа в стоке является несимметричным, так как степень легирования  $n^-$ -области дрейфа в стоке значительно меньше, чем  $p$ -области подложки. Поэтому для данного  $p$ - $n$  перехода  $l_{оо}^p \ll l_{оо}^n$ , а также  $\tau_p \ll \tau_n$ , следовательно, можно учитывать только ионизационный ток носителей, образовавшихся в  $n^-$ -области дрейфа. Кроме того, область дрейфа является протяженной (по сравнению с шириной обедненной области  $l_{оо}^n$ ) и слаболегированной, поэтому согласно [20] для данной области можно учитывать только запаздывающую компоненту ионизационного тока.

Таким образом, ионизационный ток мощного вертикального МОП-транзистора определяется ионизационным током перехода подложка-область дрейфа в стоке и может быть учтен включением в эквивалентную схему транзистора генератора тока  $I_{пс}$ . Ток данного генератора согласно формуле (8) (см. в п. 1.2.1) задается следующим образом:

$$I_{пс}(t) = I_{зап}(t) = q \cdot S_{p-n} \cdot \int_0^t g(t-z) \cdot \left( \frac{\sqrt{D_n} \cdot e^{-z/\tau_n}}{\sqrt{\pi \cdot z}} \right) dz. \quad (19)$$

Скорость генерации электронно-дырочных пар  $g(t)$  во время облучения импульсом гамма-излучения определяется в соответствии с (6).

Временная зависимость мощности экспозиционной дозы гамма-излучения может быть записана, подобно тому, как это сделано в [24], следующим образом:

$$P_\gamma(t) = P_{\gamma\_max} \cdot f_\gamma(t), \quad (20)$$

где  $P_{\gamma\_max}$  – максимальная мощность экспозиционной дозы гамма-излучения;

$f_\gamma(t)$  – форма импульса гамма-излучения.

С учетом (6) и (20) выражение для тока генератора  $I_{\text{nc}}$  (19) принимает вид:

$$I_{\text{nc}} = q \cdot S_{p-n} \cdot g_0 \cdot \sqrt{\frac{D_n}{\pi}} \cdot P_{\gamma\_max} \cdot \int_0^t f_{\gamma}(t-z) \cdot \left( \frac{e^{-\frac{z}{\tau_n}}}{\sqrt{z}} \right) dz \quad (21)$$

Введем постоянную  $K_{\text{ion}}$ , такую что:

$$K_{\text{ion}} = q \cdot S_{p-n} \cdot g_0 \cdot \sqrt{\frac{D_n}{\pi}} \quad (22)$$

Тогда выражение (21) можно записать в виде:

$$I_{\text{nc}} = K_{\text{ion}} \cdot P_{\gamma\_max} \cdot \int_0^t f_{\gamma}(t-z) \cdot \left( \frac{e^{-\frac{z}{\tau_n}}}{\sqrt{z}} \right) dz \quad (23)$$

Как было показано выше, ионизационный ток мощного вертикального МОП-транзистора определяется ионизационным током перехода подложка-область дрейфа в стоке. Следовательно, для корректного описания работы рассматриваемого типа транзистора при воздействии импульса излучения достаточно ввести в эквивалентную схему прибора один генератор, моделирующий протекание тока в переходе подложка – область дрейфа в стоке (см. рисунок 27).

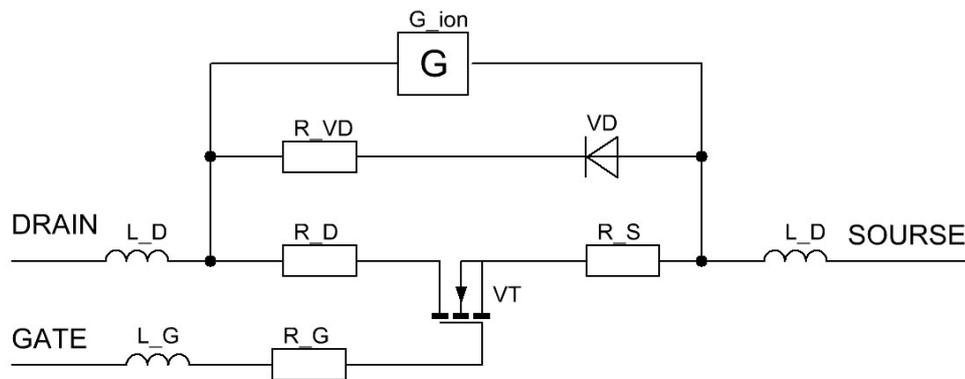


Рисунок 27- Эквивалентная схема мощного МОП-транзистора при воздействии импульса гамма-излучения

В эквивалентной схеме введены обозначения:

- VT – стандартная SPICE-модель МОП-транзистора. Параметры модели были измерены и задавались при моделировании как показано в п. 2.1;

- R\_G, R\_D, R\_S – сопротивления затвора, стоковой и истоковой областей. Введение сопротивлений R\_D и R\_S особенно важно для учета

тока, определяемого носителями заряда, образованными вне р-п перехода, то есть запаздывающей компоненты ионизационного тока;

-  $L_G$ ,  $L_D$ ,  $L_S$  – индуктивности выводов затвора, стока и истока соответственно. Значения индуктивностей выводов  $L_G$ ,  $L_D$ ,  $L_S$  были измерены непосредственно для данных транзисторов и составили 5 нГн;

-  $VD$  – диод, моделирующий переход подложка-область дрейфа в стоке;

-  $R_{VD}$  – сопротивление диода  $VD$ ;

-  $G_{ion}$  - генератор тока, моделирующий протекание ионизационного тока через переход подложка-область дрейфа в стоке, значение тока данного генератора определяется согласно формуле (23).

Таким образом, параметрами данной модели являются:  $P_g^{max}$ ,  $K_{ion}$ . При этом  $P_g^{max}$  задается в соответствии с импульсом, реакция на воздействие которого моделируется. Следовательно, дополнительным варьируемым параметром данной модели является только  $K_{ion}$ . Данный коэффициент определялся в соответствии с (22) с учетом выражения для коэффициента

диффузии  $D = \left( \frac{kT}{q} \right) \cdot \mu$ :

$$K_{ion} = q \cdot S_{p-n} \cdot g_0 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T \cdot \mu_n}{q \cdot \pi}}, \quad (24)$$

$q$  – заряд электрона,  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;

$S_{p-n}$  – площадь р-п перехода подложка-область дрейфа в стоке;

$g_0$  - константа образования электронно-дырочных пар, для кремния

$$g_0 = 4,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{рад}^{-1}.$$

$k$  – постоянная Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;

$T$  – температура,  $300^\circ\text{K}$ ;

$\mu_n$  – подвижность электронов в кремнии  $1360 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при температуре  $T=300^\circ\text{K}$ .

Площадь р-п перехода подложка - область дрейфа в стоке определяется выражением:

$$S_{p-n} = S_{p-n}^{яч} \cdot N_{яч} = \pi \cdot r_p^2 \cdot N_{яч}, \quad (25)$$

где  $S_{p-n}^{яч}$  - площадь p-n перехода подложка-область дрейфа в стоке одной ячейки была определена при помощи физико-топологического моделирования,  $150 \text{ мкм}^2$ ;

$N_{яч}$  – количество ячеек,  $1,7 \cdot 10^5$  (см. экспериментальные данные в п. 4.1).

$r_p$  – радиус p-области,  $5 \text{ мкм}$ .

Таким образом, при помощи физико-топологического моделирования было получено значение  $K_{ion}=3 \cdot 10^{-6} (\text{А} \cdot \text{с}^{1/2})/\text{Р}$ . Данный параметр является основным в SPICE-модели для учета влияния импульса гамма-излучения. Полученное значение позволило доработать SPICE-модель для корректного описания отклика транзистора при воздействии импульса гамма-излучения.

Для удобства моделирования форма импульса  $f(t)$  была аппроксимирована по методу наименьших квадратов для соответствия стандартной форме импульса. Полученная функция  $f(t)$  следующая:

$$f(t) = \sum_{i=1}^4 \frac{A_i}{N} \cdot e^{(-a_i \cdot t)}, \quad (26)$$

где  $A_1=1,5427$ ,  $a_1=1,0150 \cdot 10^8$ ,  $A_2=1,0148$ ,  $a_2=1,0323 \cdot 10^8$ ,  $A_3=2,4844$ ,  $a_3=1,2120 \cdot 10^8$ ,  $A_4=-5,0419$ ,  $a_4=1,1150 \cdot 10^8$ ,  $N=9,2799 \cdot 10^{-3}$  – нормирующий множитель.

Соответствие данной функции форме экспериментально полученных импульсов гамма-излучения показано на примере одного импульса и представлено на рисунке 28.

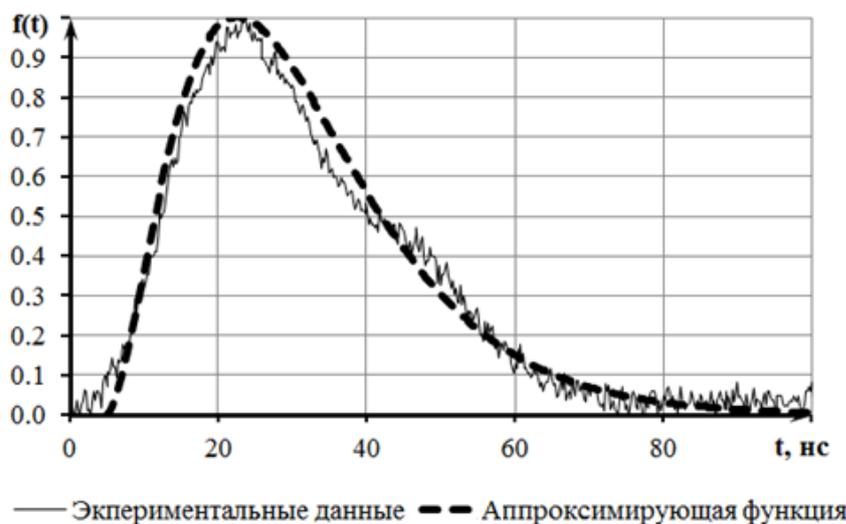


Рисунок 28 - Аппроксимация импульса гамма-излучения

Эквивалентная схема, показанная на рисунке 27, была реализована на языке SPICE. В результате была получена следующая SPICE-модель рассматриваемого транзистора с учетом воздействия импульсного гамма-излучения, представленная ниже.

```
.subckt MOSFET_Pg GATE DRAIN SOURCE Pg_zap params: Pg_max=0 K_ION=9e-6
+ CJO_DIODE = 6.399E-009
+ M_DIODE = 0.4348
+ VJ_DIODE = 0.936
*Источник ионизирующего тока
GI_ion 4 3 VALUE={Pg_max*V(Pg_zap)*K_ION}
*Индуктивности выводов
L_S 3 SOURCE 5n
L_D 4 DRAIN 5n
L_G 13 GATE 5n
*Сопротивления областей транзистора
R_D 4 9 0.02
R_S 3 6 0.0165
R_G 12 13 1
M1 9 12 6 6 MOSFET
+ L = 1E-006
+ W = 1.7E-005
+ AS = 0 PS = 0 AD = 0 PD = 0
+ M = 2.124E+005
.MODEL MOSFET NMOS
+ LEVEL = 3
+ UO = 710
+ VTO = 2.94
+ NFS = 1E-13
+ TOX = 3.5E-08
+ NSUB = 1E+17
+ NSS = 0
+ VMAX = 1.9E+05
+ RS = 0
+ RD = 0
+ RSH = 0
+ CBD = 0
+ CBS = 0 CJ = 0
+ MJ = 0.5
+ CJSW = 0.33
+ IS = 8E-07
+ PB = 0.8
+ FC = 0.5
+ XJ = 2E-07
+ LD = 4E-09
+ DELTA = 0 THETA = 0
+ ETA = 0
+ KAPPA = 0
+ GAMMA = 1.55
+ PHI = 0.085
*Модель диода
R_VD 4 5 0.0095
D1 3 5 MOSFET_diode
.MODEL MOSFET_diode D
+ IS = 3.823E-012
+ N = 1.014
+ CJO = 0 M = 0
+ VJ = 1
.ends MOSFET_Pg
```

### 2.3 Сравнение результатов схемотехнического моделирования с экспериментальными данными

Полученная в результате экстракции параметров SPICE-модель без учета воздействия импульса гамма-излучения описывает результаты экспериментов как показано на рисунках 29 и 30. Графики переходных и выходных характеристик для образца № 6, как наиболее близкого к среднему по выборке, соотнесены с результатами моделирования.

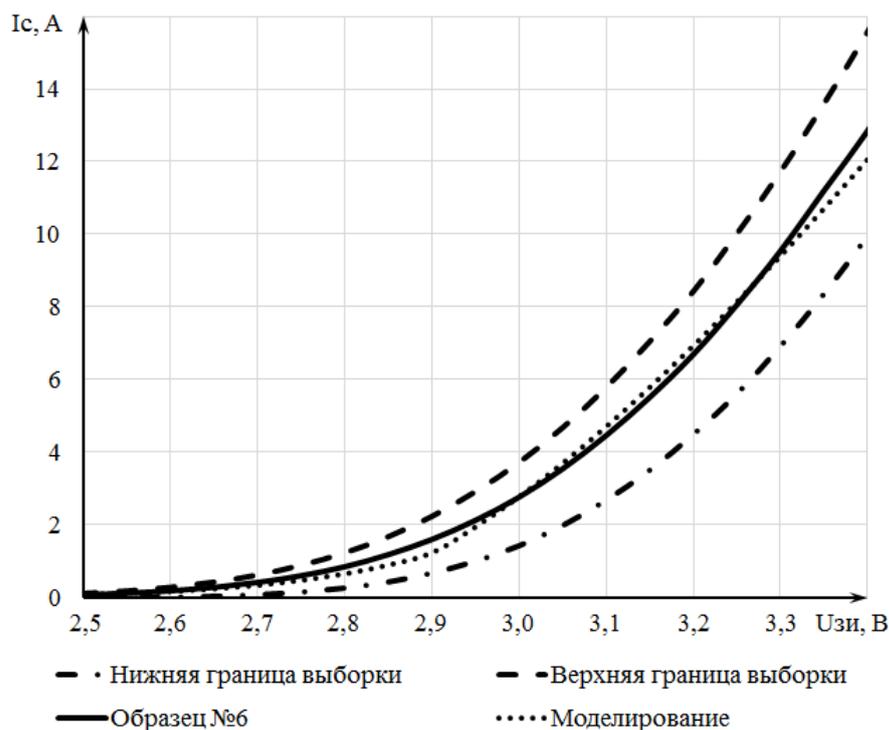


Рисунок 29 – Сравнение передаточных характеристик, полученных в результате моделирования и полученных экспериментально при  $U_{си} = 5$  В

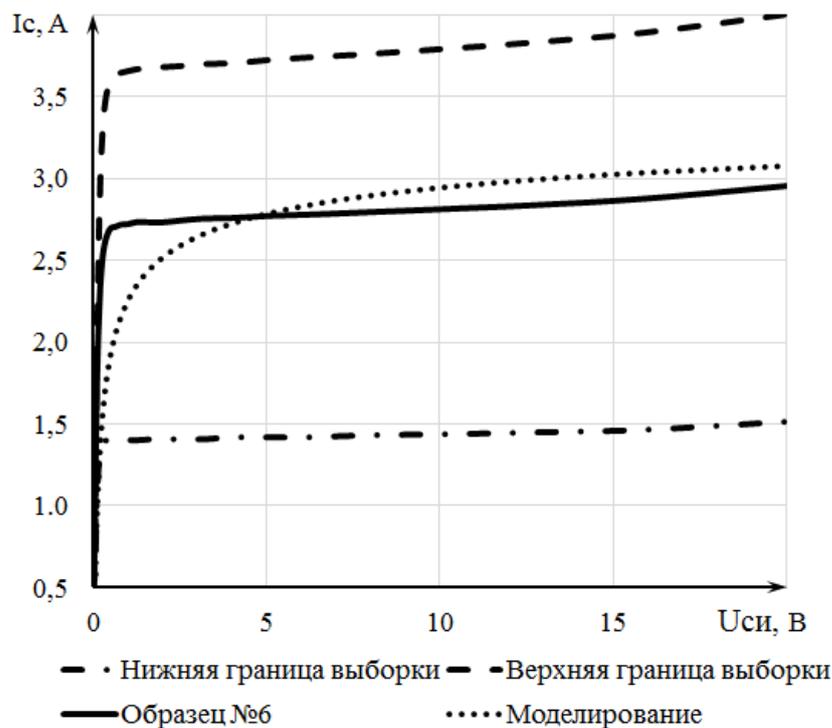


Рисунок 30 – Сравнение выходных характеристик, полученных в результате моделирования и полученных экспериментально при  $U_{зи} = 3,0$  В

Из графиков, приведенных на рисунках 29 и 30, видно, что результаты моделирования лежат в диапазоне измеренных значений для выборки транзисторов и описывают экспериментальные данные для образца наиболее близкого к среднему по выборке (образец №6) с погрешностью не более 30% без учета воздействия гамма-излучения. Таким образом, разработанная модель может быть использована для разработки на ее основе модели с учетом воздействия гамма-излучения.

Для апробации модели, доработанной с целью учета воздействия импульсного гамма-излучения, в САПР схемотехнического моделирования была воспроизведена схема измерений радиационно-наведенных в транзисторе токов (см. рисунок 31). На рисунке 31 показан способ, с помощью которого в рассматриваемой САПР возможно задание источника ионизационного тока внешним файлом. Расчет значения ионизационного тока производится согласно формуле (23) вне пакета, а затем подгружается внешним файлом.

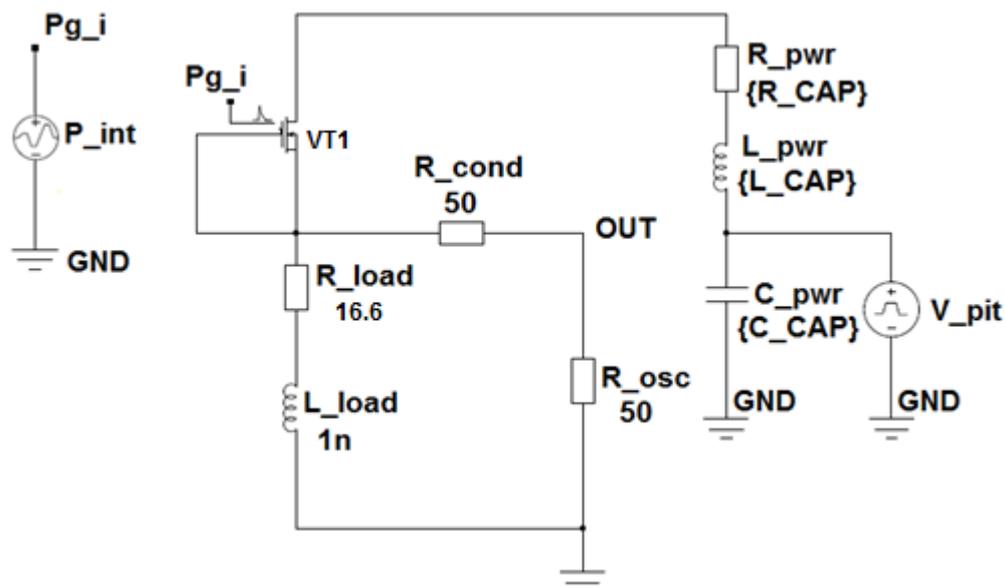


Рисунок 31 – Схема, используемая при моделировании схемы эксперимента по определению радиационно-наведенных токов в транзисторе

На рисунке 31 исследуемый транзистор представлен в виде условно-графического обозначения  $VT1$ , к которому привязана разработанная выше SPICE-модель мощного МОП-транзистора.  $R_{load}$  представляет собой сопротивление нагрузки в эксперименте,  $L_{load}$  – индуктивность нагрузки,  $R_{cond}$  – согласующее сопротивление,  $R_{osc}$  соответствует сопротивлению осциллографа,  $C_{pwr}$  – питающему конденсатору,  $L_{pwr}$  – индуктивности питающей линии,  $V_{pit}$  – источнику питания. Напряжение с точки  $Pg_i$  передается на вывод  $Pg_i$  транзистора и используется внутренними узлами эквивалентной схемы транзистора для задания тока генератора ионизационного тока  $G_{ion}$  в модели транзистора.

С использованием схемы, представленной на рисунке 31, было проведено моделирование эксперимента по определению реакции рассматриваемого транзистора на воздействие импульсного гамма-излучения. При этом регистрируемой величиной являлась временная зависимость напряжения в точке  $OUT$ . Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показано на рисунке 32. Регистрируемое напряжение обозначено  $V_{out}$ , при этом результаты моделирования показаны пунктиром, а экспериментальные данные – сплошной линией.

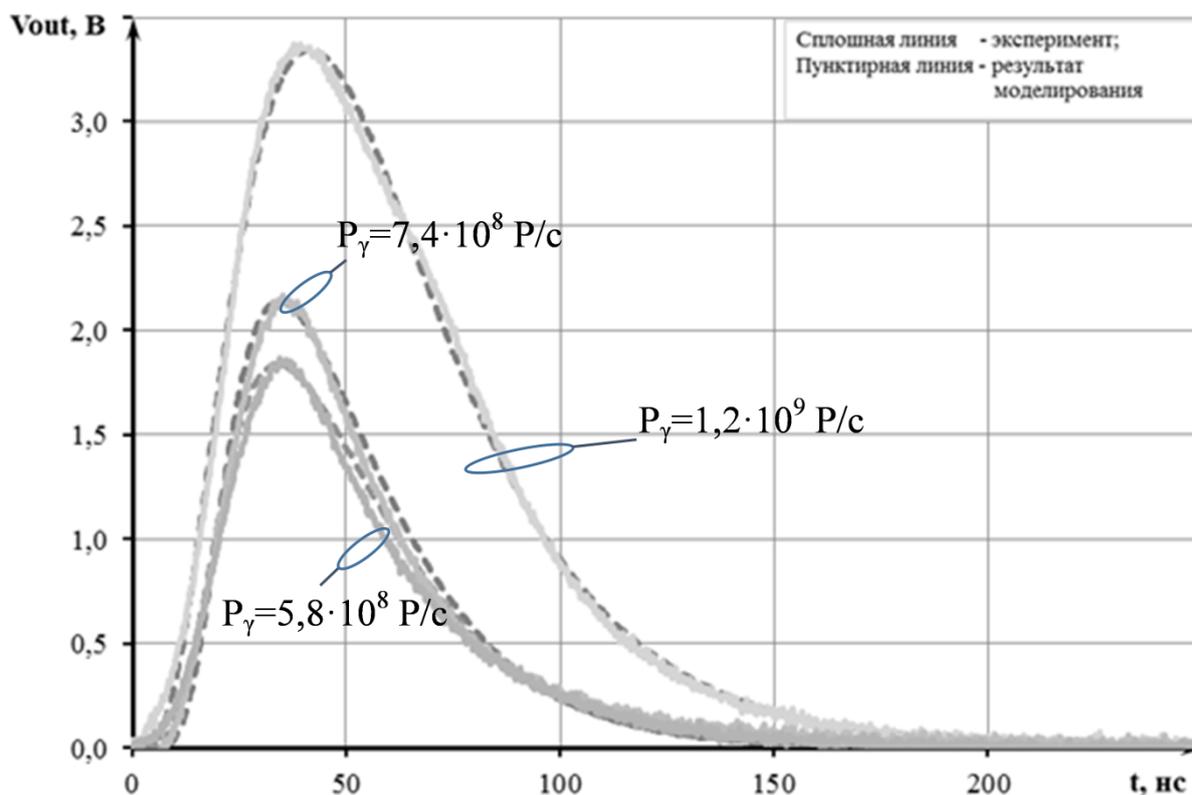


Рисунок 32 - Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными при  $V_{си}=30$  В

Из рисунка 32 видно, что результаты моделирования хорошо описывают экспериментально измеренный отклик транзистора. При моделировании параметр модели  $K_{ion}$  принимался равным  $\sim 3,0 \cdot 10^{-6}$ . С точки зрения количественной оценки схождения результатов моделирования с экспериментом наибольший практический интерес представляют такие параметры отклика транзистора как:

1)  $V_{max}$  - амплитуда отклика;

2)  $\Delta t$  - длительность отклика. Данное значение определяется на уровне сигнала  $V^{0,1}$  следующим образом:

$$\Delta t = t_2^{0,1} - t_1^{0,1}; \quad (27)$$

где  $t_1^{0,1}$  - значение времени, за которое на переднем фронте отклика достигается уровень сигнала, равный  $V^{0,1} = 0,1 \cdot V_{max}$ , нс;

$t_2^{0,1}$  - значение времени, за которое на спаде отклика достигается уровень сигнала  $V^{0,1}$ , нс;

Именно эти параметры показывают какой по величине и длительности следует ожидать отклик транзистора при воздействии импульса гамма-излучения. Значения критериальных параметров откликов транзисторов, полученных экспериментально и в результате моделирования, приведены в таблице 3. Кроме того, в таблице 3 приведены относительные погрешности для каждого критериального параметра, рассчитанные следующим образом:

$$\Delta = \frac{X_{\text{расч}} - X_{\text{экспер}}}{X_{\text{экспер}}} \cdot 100\% . \quad (28)$$

Таблица 3 – Параметры моделирования и критериальные параметры для сравнения с экспериментальными данными

$P_{\text{ог}}^{\text{max}}, \text{P/c}$	$\Delta t, \text{нс}$			$V_{\text{max}}, \text{В}$		
	расчет	эксперим.	$\Delta, \%$	расчет	эксперим.	$\Delta, \%$
$5,8 \cdot 10^8$	94,60	96,0	1,5	1,84	1,87	1,8
$7,4 \cdot 10^8$	89,20	95,0	6,1	2,14	2,17	1,4
$1,2 \cdot 10^9$	120,20	117,2	2,6	3,34	3,37	0,8

Как видно из таблицы 3, относительная погрешность определения критериальных параметров отклика транзистора следующая:

- амплитуды отклика транзистора не превышает 2 %;
- длительности отклика транзистора не превышает 7 %.

Следовательно, разработанная модель мощного МОП-транзистора может быть применима для оценки работы электронных схем на его основе.

## 2.4 Методология интеграции разработанной SPICE-модели в САПР электронных схем

Выше была показана разработанная SPICE-модель мощного вертикального ДМОП-транзистора. Существующие САПР схемотехнического моделирования не предназначены для расчетов схем в условиях радиационных воздействий, поэтому возможность прямого задания уровней таких воздействий средствами САПР отсутствует. Поэтому следует применять предоставленные пользователю возможности САПР, предназначенные для проведения анализа работы схемы в нормальных условиях. Предлагаемые для решения данной задачи методы рассмотрены в [39] и состоят в следующем:

- использование глобальных параметров расчета. Применение глобальных параметров предусмотрено возможностями САПР, в одном сеансе моделирования возможно проведение серии расчетов с различными значениями глобального параметра. Однако глобальные параметры расчета не могут задаваться переменными во времени, поэтому не подходят для задания форм импульсов ИИ и могут использоваться только для задания значения параметра ИИ. Например, при учете в модели необратимых изменений, как это сделано в [28 - 30], модель не изменяется и требуется только задавать значение параметра не численно, а при помощи зависимости от воздействующего фактора. В этом случае при проведении расчетов удобно воздействующий фактор представлять в виде глобального параметра;
- введение на рабочую область дополнительных участков схемы, к которым будет осуществляться подача импульса излучения во времени. Такой подход необходим при учете в моделях обратимых эффектов, возникающих при воздействии импульса излучения. Однако возможность задания параметров данных моделей изменяющимися во времени отсутствует, что затрудняет процесс создания модели прибора, описывающей его работу в ходе облучения. Решением данной проблемы может стать использование

управляемых источников токов и напряжений, так как данные элементы являются единственными электронными компонентами, параметры моделей которых могут меняться во времени. В качестве управляющего напряжения предлагается использовать потенциал узла схемы, задаваемого при помощи источников напряжений, временной ход ЭДС которых задается:

- 1) произвольным математическим выражением (см. рисунок 33а);
- 2) массивом точек  $[t_i; V(t_i)]$ , хранящимся во внешнем файле (см. рисунок 33б).

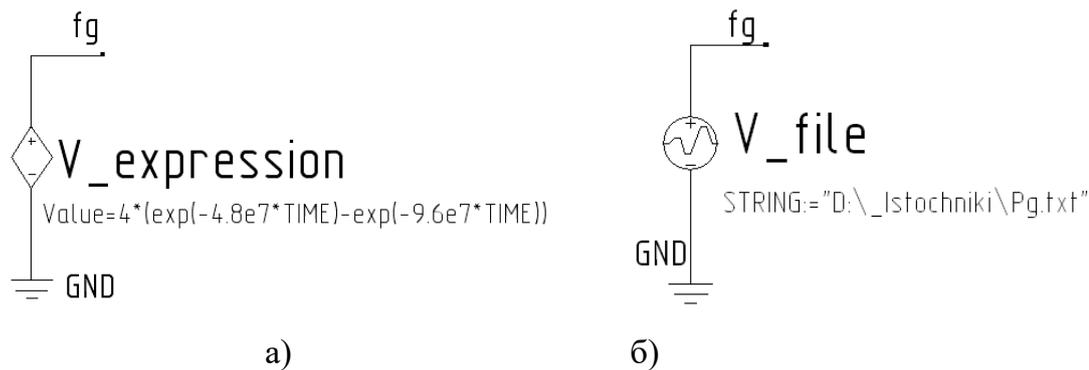


Рисунок 33 – Источники напряжения, используемые для задания импульса излучения: а) источник, временной ход ЭДС которого задается произвольным математическим выражением б) источник, задаваемый внешним файлом

Таким образом, при помощи встроенных средств САПР решается задача введения в качестве воздействующего фактора ИИ.

Для учета воздействия ИИ при моделировании полупроводниковый прибор заменяется его эквивалентной схемой. Такие эквивалентные схемы являются громоздкими, что затрудняет работу в САПР при проектировании электронных схем, содержащих несколько десятков полупроводниковых приборов. Для упрощения работы пользователя в САПР предлагается создание для каждого полупроводникового прибора такого элемента библиотеки САПР, чтобы его внутренняя электрическая схема соответствовала эквивалентной схеме прибора в условиях радиационных воздействий, а на схеме данный элемент отображался в виде условно-

графического обозначения (УГО) с дополнительными электрическими выводами, использующимися для задания воздействующих параметров ионизирующих излучений.

Рассмотрим процедуру интеграции разработанной SPICE-модели с учетом воздействия импульсного гамма-излучения в САПР на примере модели исследуемого МОП-транзистора.

В результате анализа структуры исследуемого типа транзистора (см. рисунок 26) было определено, что хоть в структуре и присутствуют два p-n перехода, однако, ионизационный ток истокового перехода вносит меньший вклад в работу транзистора. Поэтому при разработке эквивалентной схемы прибора к стандартной SPICE-модели МОП-транзистора VT1 был добавлен только генератор тока  $G_{ion}$  (см. рисунок 27). Для создания элемента библиотеки САПР описанная выше модель была записана в файл **MOSFET\_Pg.lib** на языке SPICE.

Для удобства использования разработанной модели в САПР создается новое УГО МОП-транзистора путем добавления к стандартному дополнительному выводу z для возможности подачи к данному элементу формы импульса гамма-излучения, а для визуального отличия данного элемента в левом верхнем углу добавлено схематичное обозначение импульса (см. рисунок 34).

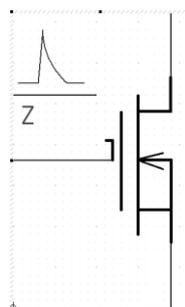


Рисунок 34 - УГО модели схема вертикального ДМОП-транзистора

В качестве модели к данному УГО привязывается файл с разработанной моделью **MOSFET\_Pg.lib**. Получаем элемент библиотеки, который на схеме

выглядит как МОП-транзистор с дополнительным выводом, а его внутренняя схема содержит в себе учет воздействия импульсного гамма-излучения.

## Выводы по главе 2

В главе описана разработанная SPICE-модель мощного вертикального ДМОП-транзистора, при этом:

1. Разработана отсутствующая до этих пор SPICE-модель исследуемого типа прибора без учета влияния излучения на работу транзистора. С этой целью при помощи САПР создания SPICE-моделей были экстрактированы параметры модели MOS3. Результаты моделирования с применением разработанной модели лежат в диапазоне измеренных значений для выборки транзисторов и описывают экспериментальные данные для образца наиболее близкого к среднему по выборке с погрешностью не более 30% без учета воздействия гамма-излучения. Таким образом, разработанная модель может быть использована для разработки на ее основе модели с учетом воздействия гамма-излучения.

2. Проведена доработка эквивалентной схемы исследуемого прибора путем введения в эквивалентную схему прибора одного генератора, моделирующего протекание тока в переходе подложка – область дрейфа в стоке, ток данного генератора имитирует ионизационный ток p-n перехода. Параметры генератора настроены для соответствия экспериментальным данным.

Результаты моделирования с применением разработанной модели с учетом влияния импульсного гамма-излучения хорошо описывают экспериментально измеренный отклик транзистора. С точки зрения количественной оценки схождения результатов моделирования с экспериментом наибольший практический интерес представляют такие параметры отклика транзистора как амплитуда и длительность отклика. Относительная погрешность определения критериальных параметров

отклика транзистора не превышает 10 %. Следовательно, разработанная модель мощного МОП-транзистора может быть применена для оценки работы электронных схем на его основе.

3. Разработан элемент библиотеки, который на схеме выглядит как МОП-транзистор с дополнительным выводом, а его внутренняя схема содержит в себе учет воздействия импульсного гамма-излучения. Применение данного элемента имеет высокое прикладное значение так как позволяет упростить процесс расчета для разработчика схемы.

В процессе внедрения разработанной модели в существующую среду САПР решена задача введения в качестве воздействующего фактора импульсного гамма-излучения.

Существующие САПР схемотехнического моделирования не предназначены для расчетов схем в условиях радиационных воздействий, поэтому возможность прямого задания уровней таких воздействий средствами САПР отсутствует.

Для учета воздействия ИИ при моделировании полупроводниковый прибор заменяется его эквивалентной схемой. Такие эквивалентные схемы являются громоздкими, что затрудняет работу в САПР при проектировании электронных схем, содержащих несколько десятков полупроводниковых приборов. Для упрощения работы пользователя в САПР предлагается создание для каждого полупроводникового прибора такого элемента библиотеки САПР, чтобы его внутренняя электрическая схема соответствовала эквивалентной схеме прибора в условиях радиационных воздействий, а на схеме данный элемент отображался в виде условно-графического обозначения с дополнительными электрическими выводами, используемыми для задания воздействующих параметров ионизирующих излучений.

### **Глава 3 Физико-топологическая модель реакции мощного вертикального ДМОП-транзистора на воздействие импульса гамма-излучения**

Третья глава посвящена разработке физико-топологической модели мощного вертикального ДМОП-транзистора с учетом импульсного гамма-излучения

В п. 3.1 приведен перечень исходных данных, необходимых для разработки физико-топологической модели. Показано, что при разработке таких моделей нужны данные о геометрических размерах и уровнях легирования областей полупроводниковой структуры транзистора, а также электрофизические параметры материалов структуры, такие как подвижности и время жизни носителей заряда. В настоящей работе для задания исходных данных физико-топологической модели использовалось технологическое моделирование, которое применялось для решения обратной задачи: по известным электрическим характеристикам и геометрическим размерам структуры прибора определялись параметры технологии изготовления рассматриваемого прибора.

В п. 3.2 рассмотрены использованные принципы учета в физико-топологической модели мощного вертикального ДМОП-транзистора воздействия импульсного гамма-излучения. Основой физико-топологической модели является решение применительно к рассматриваемой структуре уравнения Пуассона, уравнений непрерывности. Выражения для плотности тока в данном случае использовались для диффузионно-дрейфовой модели переноса носителей.

Так как инструментарием среды технологического моделирования учет воздействия импульса гамма-излучения не предусмотрен, то такой учет был произведен при помощи встроенного оператора генерации носителей в полупроводнике при воздействии светового излучения. Для учета образовавшихся в момент облучения носителей использована известная

зависимость коэффициента генерации электронно-дырочных пар  $G(t)$  от мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения  $P_\gamma(t)$ . Ввиду того, что импульсное гамма-излучение, как известно, как раз и приводит к возникновению дополнительных электронно-дырочных пар в материалах прибора, в данном случае применение данного оператора в целях учета импульса гамма-излучения обосновано. Зависимость  $P_\gamma(t)$  при этом задавалась в соответствии с экспериментальным импульсом гамма-излучения.

В п. 3.3 приведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Для исследуемой структуры были рассчитаны вольт-амперные характеристики (ВАХ). Так как известно, что параметры полупроводниковых приборов даже внутри партии имеют некоторый разброс, то ВАХ, полученные в результате расчета, сравнивались с экспериментальными данными для выборки из 20 транзисторов рассматриваемого типа из одной партии. Полученные в результате моделирования ВАХ лежат в диапазоне для выборки транзисторов, определенном экспериментально. Следовательно, примененный комплекс из физико-топологического и технологического типов моделирования позволяет разработать модель, описывающую работу транзистора исследуемого типа в нормальных условиях.

Также для полученной структуры был рассчитан ионизационный ток на истоке транзистора при отсутствии управляющего напряжения  $V_{зи} = 0$  В и при питающем напряжении  $V_{си} = 5$  В.

Показано, что физико-топологическая модель мощного вертикального ДМОП-транзистора, разработанная с использованием технологического моделирования, позволяет предсказывать амплитуду ионизационного тока транзистора и длительность протекания такого тока. Определение данных величин имеет важное прикладное значение, так как позволяет при конструировании схемы на основе данного элемента учесть возможное

возникновение радиационно-индуцированных токов в цепи с данным транзистором.

Показаны полученные при помощи данной модели распределения концентрации носителей заряда  $N$  (электронов и дырок) в трех наиболее интересных сечениях элементарной ячейки структуры: в области расположения перехода  $p^+-n^-$ , в области чередования переходов  $n^+-p$  и  $p-n^-$  и в области расположения канала. Для всех сечений показано изменение концентрации носителей в выбранном сечении до облучения и при воздействии импульсного гамма-излучения со значениями мощности дозы  $P_\gamma = 10^5$  и  $P_\gamma = 10^{12}$  Р/с. При облучении импульсом гамма-излучения с небольшим значением мощности экспозиционной дозы гамма-излучения ( $P_\gamma = 10^5$  Р/с) концентрация неосновных носителей в каждой области увеличивается вследствие генерации, но остается значительно меньше концентрации основных носителей. Данное изменение приведет к изменению в работе прибора в виде протекания ионизационных токов, но амплитуда данных токов мала и не приведет к необратимым изменениям. После прекращения действия импульса сгенерированные носители полностью рекомбинируют и работа прибора возобновится.

При воздействии импульса гамма-излучения со значением  $P_\gamma = 10^{12}$  Р/с количество сгенерированных неосновных носителей становится сравнимым с количеством основных носителей в области, то есть происходит «заливание»  $p-n$  перехода и нарушается работа прибора так, что даже последующая рекомбинация не приведет к возобновлению нормальной работы прибора, то есть будут наблюдаться необратимые явления.

### 3.1 Исходные данные, необходимые для разработки модели

В ходе физико-топологического моделирования решаются основные уравнения физики полупроводников применительно к структуре прибора. Поэтому для построения физико-топологической модели в качестве исходных данных требуется наиболее точно задать структуру прибора как совокупность данных о ее геометрических размерах и распределении носителей в основных ее слоях. Весь перечень исходных данных приведен ниже.

#### **Необходимые данные о структуре:**

- толщина исходной кремниевой пластины  $d_{n^+}$ ;
- толщина эпитаксиального слоя  $d_{n^-}$ ;
- толщина  $p^+$ -области  $d_{p^+}$ ;
- длина  $p^+$ -области  $l_{p^+}$ ;
- толщина  $p$ -области  $d_p$ ;
- толщина  $p$ -области  $d_p$ ;
- толщина истоковой области  $d_{n^+}$ ;
- длина истоковой области  $l_{n^+}$ ;
- толщина подзатворного диэлектрика  $d_{\text{подз}}$ ;
- толщина затвора  $d_{\text{затв}}$ ;
- толщина надзатворного диэлектрика  $d_{\text{надз}}$ ;
- длина канала  $l_{\text{кан}}$ ;

Все указанные геометрические размеры структуры получить из нормативных документов не удалось, в связи с чем данные были получены в результате экспериментальных исследований РФЯЦ-ВНИИТФ (см. п. 4.1).

### Необходимые данные о профиле легирования:

- концентрация исходной пластины  $N_{n^+}$ ;
- концентрация эпитаксиального слоя  $N_{n^-}$ ;
- концентрация в  $p^+$ -области  $N_a(y), N_a(x)$ ;
- концентрация в  $p$ -области  $N_a(y), N_a(x)$ ;
- концентрация в  $n^+$ -области  $N_d(y), N_d(x)$ ;
- концентрация в  $n$ -области  $N_d(y), N_d(x)$ .

Обычно для восстановления профиля используют метод CV профилирования, заключающийся в измерении вольт-фарадных характеристик переходов и восстановлению профиля на основе этих данных [43 - 45]. В рассматриваемом приборе невозможно воспользоваться данным методом, как это было сделано, например, в [43, 44], так как отсутствует возможность измерения вольт-фарадных характеристик для каждого перехода ввиду того, что исследуемый транзистор является серийно-выпускаемым корпусированным прибором, имеющим вертикальную структуру.

Поэтому в настоящей работе для задания исходных данных физико-топологической модели использовалось технологическое моделирование, которое применялось для решения обратной задачи: по известным электрическим характеристикам и геометрическим размерам структуры прибора определялись параметры технологии изготовления рассматриваемого прибора. В результате моделирования процесса изготовления транзистора получали параметры его двумерной поперечной структуры. Указанная процедура итерационно повторялась несколько раз, что позволило уточнить решение [46].

Необходимость применения данного метода определяется следующим. В транзисторе рассматриваемого типа распределение примеси в основных рабочих слоях структуры формируется с помощью ионного легирования и имеет сложный и неоднородный характер, как по глубине, так и в

латеральном направлении. Кроме того, протекание токов в транзисторе при воздействии импульса гамма-излучения задействует такие области полупроводниковой структуры, которые в штатном режиме работы являются диэлектрическими и/или слабо проводящими (как будет показано в п. 3.3 на рисунке 38). Поэтому для корректного задания исходных данных и, как следствие, для построения достоверной модели важно воссоздать все рабочие области, ответственные за рассматриваемые эффекты, со сложным распределением примеси в каждой.

### 3.2 Основные принципы построения физико-топологической модели ДМОП-транзистора и учет в модели воздействия импульса гамма-излучения

Физико-топологическая модель представляет собой модель расчета электрических параметров полупроводникового прибора, исходными параметрами для которой являются электрофизические характеристики полупроводниковой структуры и топологические размеры транзистора. Основой физико-топологической модели является решение применительно к рассматриваемой структуре базовых уравнений физики полупроводников (уравнение Пуассона (1), уравнения непрерывности (2, 3))[3, 40]:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \psi = (q / \varepsilon) \cdot (n - p - C); \quad (29)$$

$$(\partial n / \partial t) - (1 / q) \cdot \operatorname{div} j_n = (G - R); \quad (30)$$

$$(\partial p / \partial t) - (1 / q) \cdot \operatorname{div} j_p = (G - R); \quad (31)$$

где  $\psi$  - электростатический потенциал,  $q$  - заряд электрона,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость,  $n$  - концентрация электронов,  $p$  - концентрация дырок,  $C$  - концентрация изолированной примеси,  $j_n$  - плотность тока электронов,  $j_p$  - плотность тока дырок,  $G$  - скорость генерации,  $R$  - скорость рекомбинации.

Выражения для плотности тока в данном случае использовались для диффузионно-дрейфовой модели переноса носителей:

$$\vec{j}_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E}_n + q \cdot D_n \cdot \nabla n;$$

$$\vec{j}_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E}_p + q \cdot D_p \cdot \nabla p \quad (32)$$

где  $\mu$  - подвижность носителей,  $E$  - эффективное электрическое поле,  $D$  - коэффициент диффузии носителей.

Для учета образовавшихся в момент облучения носителей использована известная зависимость коэффициента генерации электронно-дырочных пар  $G(t)$  от мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения  $P_\gamma(t)$  (см. выражение (6) в п. 1.2.1):

$$G(t) = g_0 \cdot P_\gamma(t). \quad (33)$$

Кроме того, как и показано в п. 1.2, при прохождении высокоэнергетичного фотона через слои материалов может наблюдаться эффект усиления дозы, поэтому были проведены расчеты методом Монте-Карло с целью определения наличия или отсутствия данного эффекта в исследуемом транзисторе при воздействии импульса гамма-излучения со стандартным спектром. Расчеты проводились для плоских пакетов материалов, соответствующих двум сечениям в структуре транзистора: кремниевой пластине в месте расположения затвора (сечение А) и в отсутствии затвора (сечение Б). Расположение сечений приведено на рисунке 35. При составлении пакетов кремниевая пластина в верхнем слое делилась на несколько слоев, толщиной 1 мкм для возможности определения эффекта усиления дозы (см. таблицу 5).

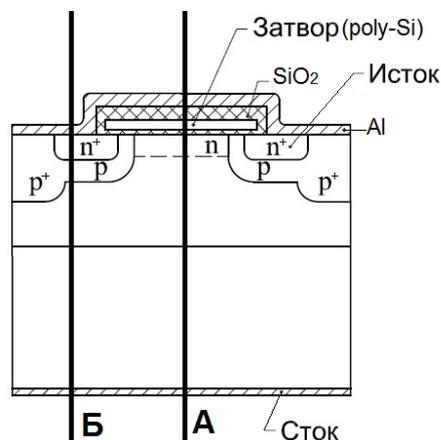


Рисунок 35 – Структура исследуемого транзистора и расположение расчетных сечений

Расчеты проводились для падающего перпендикулярно на плоский пакет материалов гамма-излучения со значением потока, равным 1 квант/см<sup>2</sup>. Спектрально-энергетический состав гамма-излучения, использованный при расчетах, соответствует типовому спектру ЯВ [42] и представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Спектрально-энергетический состав гамма-излучения

Интервал энергии квантов, МэВ	Доля квантов для интервала энергии, отн. ед
0,5 – 1,0	0,665
1,0 – 2,0	0,166
2,0 – 3,0	0,067
3,0 – 4,0	0,05
4,0 – 5,0	0,025
5,0 – 6,0	0,021
6,0 – 7,0	0,005
7,0 – 8,0	0,001

В результате расчетов были получены для каждого слоя структуры значения: поглощенной энергии  $E_{\text{погл}}$ , количества падающих, проходящих и поглощенных в слое электронов. При этом суммарная поглощенная энергия складывалась из поглощенной энергии от взаимодействия с материалом гамма-квантов, вторичных электронов и позитронов. Результаты расчетов приведены в таблице 5. Из таблицы 5 видно, что основной вклад в поглощенную энергию вносят вторичные электроны и значение поглощенной энергии в кремниевых слоях толщиной 1 мкм практически неизменно (относительное изменение не превышает 2 %). Следовательно, при воздействии гамма-излучения с указанным спектром излучения в исследуемом транзисторе, как и ожидалось, эффекта усиления дозы не наблюдается, соответственно и эффекты, связанные с неоднородным поглощением энергии, можно не учитывать.

Таблица 5 – Поглощенная энергия в результате взаимодействия гамма-квантов, вторичных электронов и позитронов с материалами структуры при падающем 1 кванте гамма-излучения, эВ

№ материала в пакете	Материал пакета	Толщина слоя, мкм	Поглощенная энергия от			
			$\gamma$ -квантов	электронов	позитронов	суммарная
<b>Сечение А</b>						
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2000	$9,97 \cdot 10^{-2}$	$1,89 \cdot 10^4$	$2,07 \cdot 10^2$	$1,91 \cdot 10^4$
2	Воздух	1000	$1,02 \cdot 10^{-5}$	4,55	$6,04 \cdot 10^{-2}$	4,61
3	Al	3	$1,77 \cdot 10^{-4}$	24,49	$3,25 \cdot 10^{-1}$	24,82
4	SiO <sub>2</sub>	0,74	$4,08 \cdot 10^{-5}$	6,52	$8,66 \cdot 10^{-2}$	6,61
5	Si	0,37	$2,45 \cdot 10^{-5}$	2,69	$3,56 \cdot 10^{-2}$	2,73
6	SiO <sub>2</sub>	0,035	$1,99 \cdot 10^{-6}$	0,32	$4,06 \cdot 10^{-3}$	0,32
7	Si	1	$6,55 \cdot 10^{-5}$	7,16	$9,49 \cdot 10^{-2}$	<b>7,26</b>
8	Si	1	$6,49 \cdot 10^{-5}$	7,20	$9,53 \cdot 10^{-2}$	<b>7,30</b>
9	Si	1	$6,44 \cdot 10^{-5}$	7,20	$9,52 \cdot 10^{-2}$	<b>7,30</b>
10	Si	1	$6,43 \cdot 10^{-5}$	7,22	$9,59 \cdot 10^{-2}$	<b>7,32</b>
11	Si	1	$6,42 \cdot 10^{-5}$	7,29	$9,72 \cdot 10^{-2}$	<b>7,39</b>
12	Si	309	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$2,14 \cdot 10^3$	$2,92 \cdot 10^1$	$2,17 \cdot 10^3$
13	Si	1	$6,17 \cdot 10^{-5}$	7,25	$1,07 \cdot 10^{-1}$	7,36
14	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2000	$1,27 \cdot 10^{-1}$	$2,38 \cdot 10^4$	$3,43 \cdot 10^2$	$2,42 \cdot 10^4$
<b>Сечение Б</b>						
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2000	$9,97 \cdot 10^{-2}$	$1,89 \cdot 10^4$	$2,07 \cdot 10^2$	$1,91 \cdot 10^4$
2	Воздух	1000	$1,03 \cdot 10^{-5}$	4,56	$6,06 \cdot 10^{-2}$	4,62
3	Al	3	$1,80 \cdot 10^{-4}$	24,54	$3,27 \cdot 10^{-1}$	24,87
4	Si	1	$6,60 \cdot 10^{-5}$	7,34	$9,72 \cdot 10^{-2}$	<b>7,44</b>
5	Si	1	$6,53 \cdot 10^{-5}$	7,26	$9,63 \cdot 10^{-2}$	<b>7,35</b>
6	Si	1	$6,49 \cdot 10^{-5}$	7,23	$9,62 \cdot 10^{-2}$	<b>7,33</b>
7	Si	1	$6,48 \cdot 10^{-5}$	7,24	$9,64 \cdot 10^{-2}$	<b>7,34</b>
8	Si	1	$6,43 \cdot 10^{-5}$	7,30	$9,75 \cdot 10^{-2}$	<b>7,40</b>
9	Si	309	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$2,14 \cdot 10^3$	$2,92 \cdot 10^1$	$2,17 \cdot 10^3$
10	Si	1	$6,23 \cdot 10^{-5}$	7,25	$1,07 \cdot 10^{-1}$	7,35
11	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2000	$1,27 \cdot 10^{-1}$	$2,38 \cdot 10^4$	$3,43 \cdot 10^2$	$2,42 \cdot 10^4$

Так как основной вклад в поглощенную энергию вносят вторичные электроны, то рассмотрим соотношение количества падающих, проходящих и поглощенных в слое электронов (см. таблицу б).

Таблица 6 - Количество падающих, проходящих и поглощенных электронов в слоях структуры

№ материала в пакете	Материал пакета	Толщина слоя, мкм	Количество электронов		
			поглощенных	падающих	проходящих
<b>Сечение А</b>					
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2000	1,61·10 <sup>-1</sup>	1,70·10 <sup>-3</sup>	7,19·10 <sup>-3</sup>
2	Воздух	1000	3,51·10 <sup>-5</sup>	8,68·10 <sup>-3</sup>	8,68·10 <sup>-3</sup>
3	Al	3	2,11·10 <sup>-4</sup>	8,66·10 <sup>-3</sup>	8,66·10 <sup>-3</sup>
4	SiO <sub>2</sub>	0,74	5,47·10 <sup>-5</sup>	8,64·10 <sup>-3</sup>	8,64·10 <sup>-3</sup>
5	Si	0,37	2,29·10 <sup>-5</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>
6	SiO <sub>2</sub>	0,035	2,76·10 <sup>-6</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>
7	Si	1	6,30·10 <sup>-5</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>
8	Si	1	6,35·10 <sup>-5</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>
9	Si	1	6,35·10 <sup>-5</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>
10	Si	1	6,37·10 <sup>-5</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>
11	Si	1	6,35·10 <sup>-5</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>
12	Si	309	1,90·10 <sup>-2</sup>	8,43·10 <sup>-3</sup>	8,56·10 <sup>-3</sup>
13	Si	1	6,02·10 <sup>-5</sup>	8,34·10 <sup>-3</sup>	8,34·10 <sup>-3</sup>
14	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2000	1,95·10 <sup>-1</sup>	6,88·10 <sup>-3</sup>	8,52·10 <sup>-3</sup>
<b>Сечение Б</b>					
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2000	1,61·10 <sup>-1</sup>	1,70·10 <sup>-3</sup>	7,19·10 <sup>-3</sup>
2	Воздух	1000	3,52·10 <sup>-5</sup>	8,68·10 <sup>-3</sup>	8,68·10 <sup>-3</sup>
3	Al	3	2,13·10 <sup>-4</sup>	8,67·10 <sup>-3</sup>	8,67·10 <sup>-3</sup>
4	Si	1	6,41·10 <sup>-5</sup>	8,65·10 <sup>-3</sup>	8,65·10 <sup>-3</sup>
5	Si	1	6,38·10 <sup>-5</sup>	8,64·10 <sup>-3</sup>	8,64·10 <sup>-3</sup>
6	Si	1	6,37·10 <sup>-5</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>
7	Si	1	6,36·10 <sup>-5</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>
8	Si	1	6,35·10 <sup>-5</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>	8,63·10 <sup>-3</sup>
9	Si	309	1,90·10 <sup>-2</sup>	8,43·10 <sup>-3</sup>	8,56·10 <sup>-3</sup>
10	Si	1	6,02·10 <sup>-5</sup>	8,34·10 <sup>-3</sup>	8,34·10 <sup>-3</sup>
11	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2000	1,95·10 <sup>-1</sup>	6,88·10 <sup>-3</sup>	8,52·10 <sup>-3</sup>

Из таблицы 6 видно, что доля поглощенных электронов мала, по сравнению с проходящими электронами. Это объясняется высокими пробегами вторичных электронов, образующихся при облучении гамма-квантами с указанным спектром.

Так как инструментарием среды технологического моделирования учет воздействия импульса гамма-излучения не предусмотрен, то такой учет был произведен при помощи встроенного оператора генерации носителей в полупроводнике при воздействии светового излучения в соответствии с выражением (33). Ввиду того, что импульсное гамма-излучение, как известно, как раз и приводит к возникновению дополнительных электронно-дырочных пар в материалах прибора, поэтому в данном случае применение данного оператора в целях учета импульса гамма-излучения обосновано. Зависимость  $P_\gamma(t)$  при этом задавалась в соответствии с экспериментальным импульсом гамма-излучения.

### 3.3 Результаты моделирования

В связи со сложностью проведения расчетов электрических режимов целого транзистора, моделирование проводилось для  $\frac{1}{2}$  элементарной ячейки структуры транзистора толщиной  $d^{\text{расч}} = 1$  мкм. Для возможности сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными значения тока стока, полученные в результате моделирования, домножались на некоторый коэффициент масштабирования. Такое упрощение расчетов стало возможным благодаря вертикальности структуры исследуемого транзистора, ввиду чего каждую элементарную ячейку можно представить как единичный транзистор, а всю совокупность ячеек – как некоторое количество включенных параллельно единичных транзисторов. Поэтому ток в цепи из всех параллельно включенных одинаковых транзисторов можно представить в виде  $I = I_{\text{яч}} \cdot K_{\text{масш}}$ .

Рассмотрим вид сверху структуры исследуемого транзистора без учета затвора, подзатворного и надзатворного диэлектриков (см. рисунок 36). При этом шестигранники, образующие структуру исследуемого транзистора, были заменены на круги для удобства проведения расчетов. Подобная замена дает небольшую погрешность в дальнейшем, которая будет входить лишь в коэффициент масштабирования и на результат моделирования не повлияет.

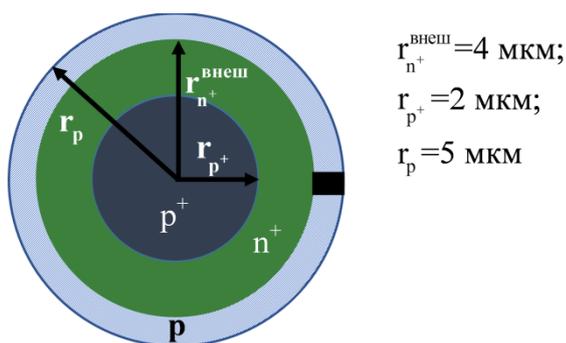


Рисунок 36 – Схематичное изображение единичной ячейки транзистора

На рисунке 36 площадь области структуры, через которую протекает ток стока в реальном приборе, показана голубым цветом, а площадь области структуры, через которую протекает ток стока при проведении двумерного

расчета, показана черным прямоугольником. На рисунке 36 также обозначены характерные размеры единичной ячейки, используемые для расчета коэффициента масштабирования.

Итак, канал образуется в р-области, ограниченной  $n^+$ -областью истока (см. рисунок 36), соответственно площадь «канального» перехода определяется площадью кольца, ограниченного радиусами  $r_p$  и  $r_{n^+}^{\text{внеш}}$ , и глубиной р-области. Так как глубины рассматриваемых слоев не меняются при переходе от двумерного моделирования к трехмерному реальному транзистору, поэтому коэффициент масштабирования будет определяться лишь отношением площадей, через которые в каждом из случаев протекает ток.

В реальном транзисторе площадь поверхности, через которую течет ток через канал, может быть определена следующим образом:

$$S_{\text{кан}} = \pi \cdot r_p^2 - \pi \cdot (r_{n^+}^{\text{внеш}})^2 = \pi \cdot (r_p^2 - (r_{n^+}^{\text{внеш}})^2). \quad (34)$$

Площадь поверхности, поперек которой течет ток через канал в двумерном расчете (на рисунке 36 обозначена черным прямоугольником), есть:

$$S_{\text{кан}}^{\text{расч}} = (r_p - r_{n^+}^{\text{внеш}}) \cdot d^{\text{расч}}. \quad (35)$$

Отношение данных площадей и есть коэффициент масштабирования для тока канала единичной ячейки  $K_{\text{кан}}$  равен:

$$K_{\text{кан}} = \frac{S_{\text{кан}}}{S_{\text{кан}}^{\text{расч}}} = \frac{\pi \cdot (r_p + r_{n^+}^{\text{внеш}})}{d^{\text{расч}}} = \frac{3,14 \cdot (5+4) \cdot \text{мкм}}{1 \text{ мкм}} \approx 30 \quad (36)$$

Как будет показано в п. 4.1, один транзистор образован около  $1,7 \cdot 10^5$  единичных ячеек. Тогда коэффициент масштабирования для всего транзистора будет равен

$$K_{\text{тр}} = K_{\text{кан}} \cdot N_{\text{яч}} = 30 \cdot 1,7 \cdot 10^5 = 5 \cdot 10^6. \quad (37)$$

В ходе проведенного технологического моделирования была получена структура, соответствующая реальной структуре прибора, определенной экспериментально. Концентрация носителей в полученной структуре в  $n^+$ , р

и  $p^+$  областях распределена неоднородно, что соответствует теоретическим представлениям о распределении примеси в приборах рассматриваемого типа.

Для данной структуры были рассчитаны вольт - амперные характеристики (ВАХ). Так как известно, что параметры полупроводниковых приборов даже внутри партии имеют некоторый разброс, то ВАХ, полученные в результате расчета, сравнивались с экспериментальными данными для выборки из 20 транзисторов рассматриваемого типа из одной партии (см. рисунок 37). Для сравнения с экспериментальными данными, результаты расчета домножались на  $K_{тр}$ .

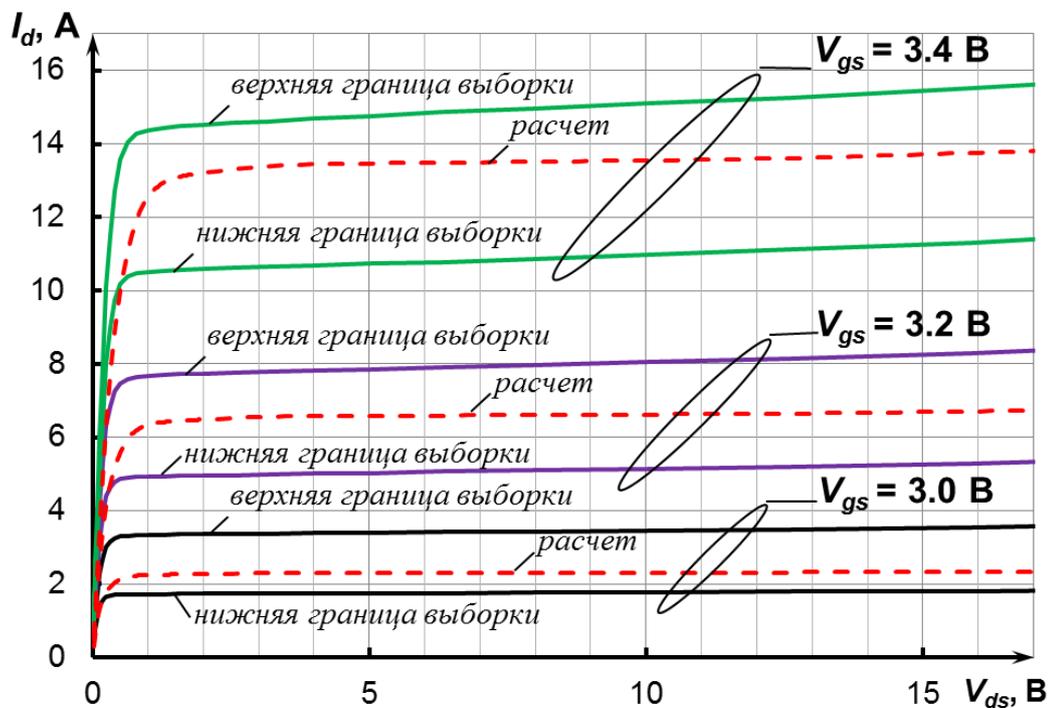


Рисунок 37 – Апробация модели ДМОП-транзистора без учета радиационных эффектов: 1, 3 – верхняя и нижняя границы выборки в эксперименте при  $V_{gs}=3.0$  В, 2 – расчет при  $V_{gs}=3.0$  В, 4, 6 - верхняя и нижняя границы выборки в эксперименте при  $V_{gs}=3.2$  В, 5 - расчет при  $V_{gs}=3.2$  В, 7, 9 - верхняя и нижняя границы выборки в эксперименте при  $V_{gs}=3.4$  В, 8 - расчет при  $V_{gs}=3.4$  В

Из рисунка 37 видно, что полученные в результате моделирования ВАХ лежат в диапазоне для выборки транзисторов, определенном экспериментально. Следовательно, примененный комплекс из физико-топологического и технологического типов моделирования позволяет разработать модель, описывающую работу транзистора исследуемого типа в нормальных условиях. Полученные несоответствия объясняются отсутствием информации о реальной технологии производства и связанными с этим неточностями, а также отличием геометрии итогового транзистора от используемой при моделировании масштабируемой единичной ячейки единичной толщины.

Также для полученной структуры был рассчитан ионизационный ток на истоке транзистора при отсутствии управляющего напряжения  $V_{gs} = 0$  и при питающем напряжении  $V_{ds} = 5$  В.

Коэффициент масштабирования результатов моделирования в данном случае отличается от рассчитанного ранее  $K_{тр}$ , так как при протекании ионизационного тока задействуются области структуры транзистора, отличные от тех, что задействуются при нормальной работе транзистора (см. рисунок 38).

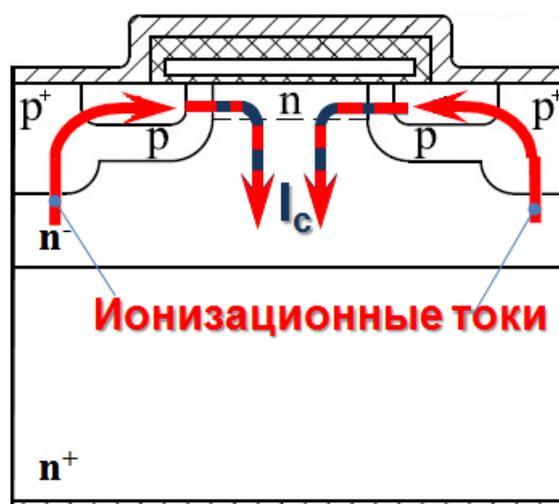


Рисунок 38 – Протекание ионизационного тока в ДМОП-транзисторе при воздействии импульса гамма-излучения

Как видно из рисунка 38, ионизационный ток (сплошная линия на рисунке 38) течет через  $p^+$ -область, как наиболее легированную, и, соответственно, имеющую наименьшее сопротивление область к истоку. Данный ток является паразитной составляющей в общем токе стока (пунктирная линия на рисунке 38). Ионизационный ток согласно выражению (21) пропорционален площади перехода, поэтому для расчета коэффициента масштабирования в этом случае будем использовать площадь  $p^+$  области (см. рисунок 39).

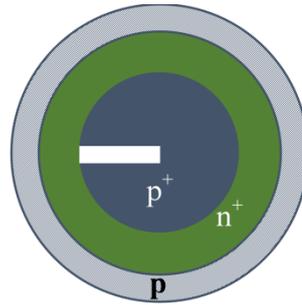


Рисунок 39 – Определение коэффициента масштабирования ионизационного тока

Площадь поверхности, через которую течет ионизационный ток в реальном транзисторе можно определить следующим образом:

$$S_{p^+} = \pi \cdot r_{p^+}^2. \quad (38)$$

Площадь поверхности, через которую течет ток в двумерном расчете на рисунке 39 обозначена белым прямоугольником на  $p^+$ -области и может быть рассчитана следующим образом:

$$S_{p^+}^{\text{расч}} = r_{p^+} \cdot d^{\text{расч}}. \quad (39)$$

Отношение данных площадей и есть коэффициент масштабирования для ионизационного тока. С учетом того, что рассматривалась единичная ячейка, то коэффициент масштабирования для тока встроенного диода единичной ячейки  $K_{\text{ион}}^{\text{яч}}$  равен:

$$K_{\text{ион}}^{\text{яч}} = \frac{S_{p^+}}{S_{p^+}^{\text{расч}}} = \frac{\pi \cdot r_{p^+}^2}{r_{p^+} \cdot d^{\text{расч}}} = \frac{3,14 \cdot 2 \text{ мкм}}{1 \text{ мкм}} = 6,28 \cong 6. \quad (40)$$

Коэффициент масштабирования для всего транзистора есть

$$K_{\text{ион}} = K_{\text{ион}}^{\text{яч}} \cdot N_{\text{яч}} = 6 \cdot 1,7 \cdot 10^5 \cong 10^6. \quad (41)$$

Значения коэффициентов  $K_{\text{ион}}$  использовались для приведения результатов моделирования в соответствие с экспериментальными данными. Сравнение результатов моделирования с экспериментом приведено на рисунке 40 [46].

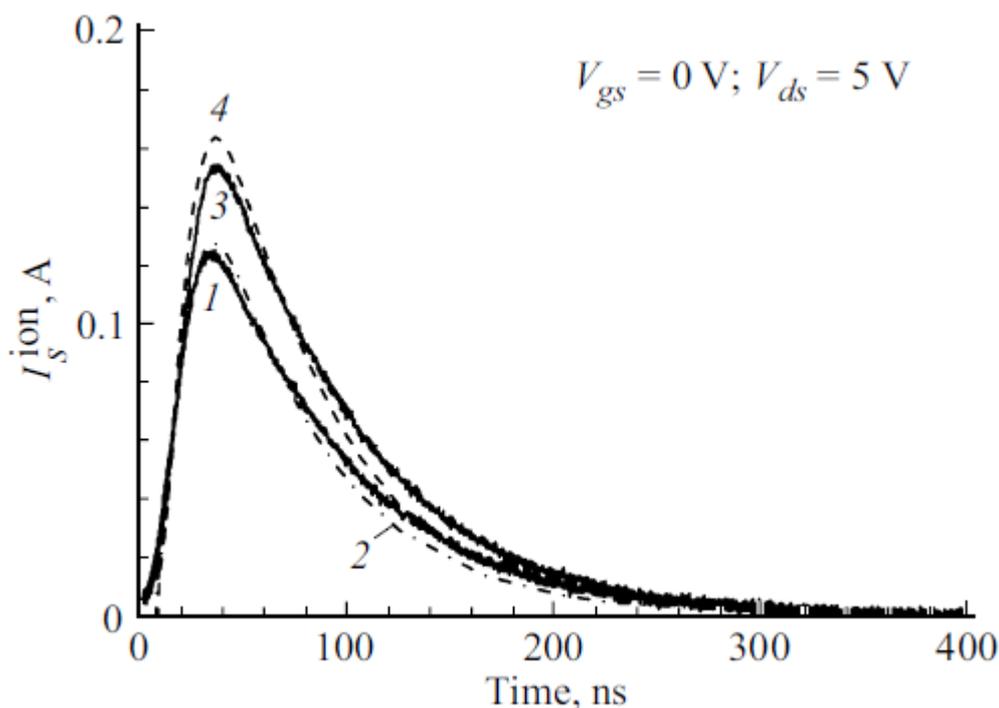


Рисунок 40 – Апробация модели: ионизационный ток транзистора в момент воздействия импульса гамма-излучения: 1, 3 – эксперимент, 2, 4 – расчет.

$$P_{\gamma} = 5.8 \cdot 10^8 \text{ P/c (1, 2)} \quad P_{\gamma} = 7.4 \cdot 10^8 \text{ P/c (3, 4)}$$

Рисунок 40 иллюстрирует тот факт, что физико-топологическая модель мощного вертикального ДМОП-транзистора, разработанная с использованием технологического моделирования, позволяет предсказывать амплитуду ионизационного тока транзистора и длительность протекания такого тока. Определение данных величин имеет важное

прикладное значение, так как позволит при конструировании схемы на основе данного элемента учесть возможное возникновение радиационно-индуцированных токов в цепи с данным транзистором.

Для иллюстрации порядка величины ионизационного тока при воздействии импульса гамма-излучения с различным значением максимальной мощности экспозиционной дозы проведено моделирование, результаты приведены на рисунке 41.

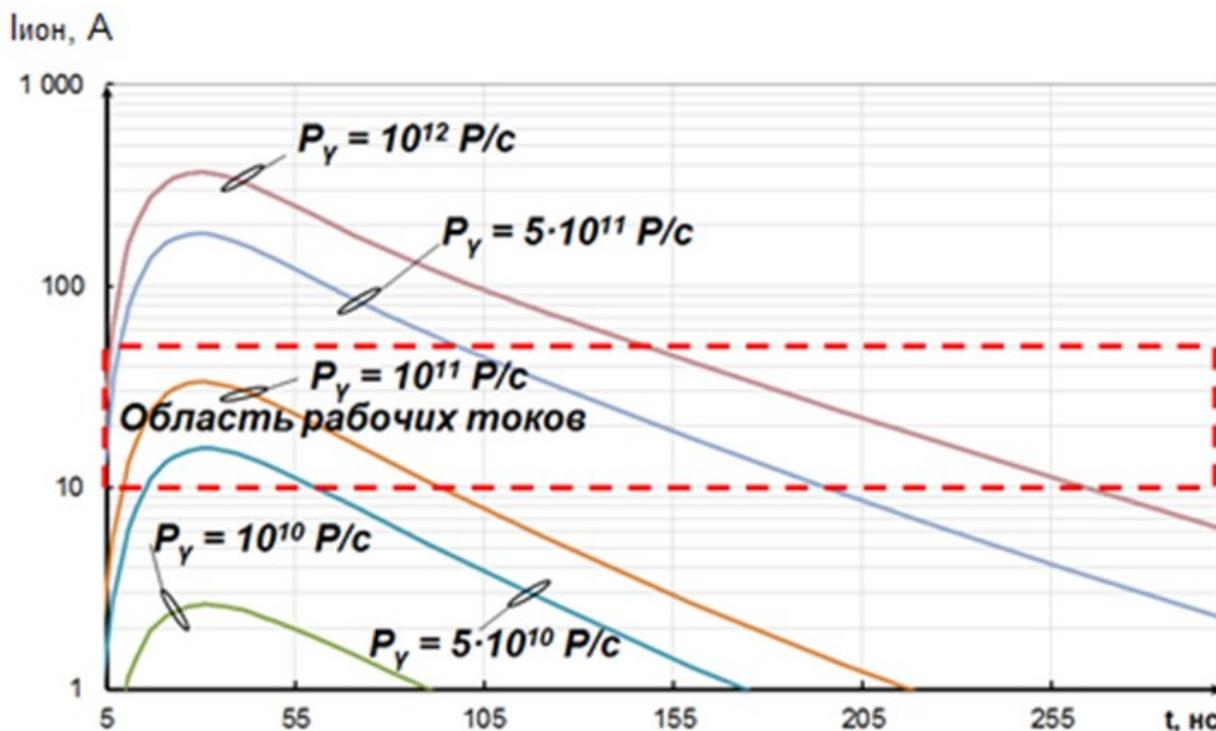


Рисунок 41 - Ионизационный ток при различных значениях мощности экспозиционной дозы гамма-излучения

Из рисунка 41 можно определить, что величина ионизационного тока начинает превышать допустимое значение рабочих токов при воздействии импульсного гамма-излучения со значением максимальной мощности экспозиционной дозы начиная с  $\sim 5 \cdot 10^{11}$  P/c.

Рассчитаем дополнительный разогрев транзистора, возникающий при протекании ионизационных токов с полученными значениями. Из рисунка 41 видно, что время протекания ионизационного тока  $\sim 100 - 250$  нс, что

позволяет считать данный процесс мгновенным по сравнению с протеканием тепловых процессов.

Из определения теплоемкости можно определить прирост температуры  $dT$ , зная сообщенное количество теплоты  $\delta Q$ , теплоемкость кремния  $C$ , равную  $0,17$  кал/(г·К), и массу  $m$  той области, через которую протекает ионизационный ток:

$$dT = \delta Q / (C \cdot m) \quad (42)$$

Количество теплоты, сообщенное транзистору при протекании ионизационного тока:

$$\delta Q = A = P \cdot dt = I^2 \cdot R \cdot dt, \quad (43)$$

где  $A$  – работа, совершенная системой, Дж;

$P$  – мощность при протекании ионизационного тока, Вт;

$dt$  – длительность протекания ионизационного тока, с;

$I$  – ионизационный ток транзистора, А;

$R$  – сопротивление области, по которой протекает ионизационный ток, Ом.

Таким образом, с учетом (43) выражение (42) можно переписать в виде:

$$dT = (I^2 \cdot R \cdot dt) / (C \cdot m). \quad (44)$$

Из рисунка 38 видно, что ионизационный ток течет, условно говоря, через цилиндр с радиусом основания  $r_p = 5$  мкм и высотой  $d = 315$  мкм. Сопротивление этой области является суммой сопротивлений всех областей, образующих структуру транзистора:

$$R = R_{n^+} + R_p + R_{n^-} + R_{n^+} \quad (45)$$

Сопротивление каждой области определяется согласно выражения:

$$R = \rho \cdot (l/S), \quad (46)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление, Ом·см;

$l$  – длина проводника, см. В рассматриваемом случае соответствует толщине области  $d$ ;

$S$  – площадь поперечного сечения проводника, см. В рассматриваемом случае соответствует площади круга, ограничивающего p-область с радиусом  $r_p$ .

Удельное сопротивление каждой области определяется в соответствии с концентрацией носителей в области [41], полученной в результате технологического моделирования:

истоковая  $n^+$ -область:  $\rho_{n^+} = 5 \cdot 10^{-3}$  Ом · см при  $N_{n^+} = 10^{19}$  см $^{-3}$ ;

p-область:  $\rho_p = 2 \cdot 10^{-1}$  Ом · см при  $N_{n^+} = 10^{17}$  см $^{-3}$ ;

$n^-$ -область:  $\rho_{n^-} = 3 \cdot 10^{-1}$  Ом · см при  $N_{n^+} = 2 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ;

стоковая  $n^+$ -область:  $\rho_{n^+} = 2 \cdot 10^{-2}$  Ом · см при  $N_{n^+} = 10^{18}$  см $^{-3}$ .

Масса области, через которую протекает ионизационный ток:

$$m = \rho^* \cdot V = \rho^* \cdot \pi \cdot r_p^2 \cdot d, \quad (47)$$

где  $\rho^*$  – плотность кремния, 2,3 г/см $^3$ .

Таким образом, подставив (45) и (46) в (44) получим выражение для определения разогрева транзистора, возникающего при протекании ионизационных токов:

$$dT = \frac{I^2 \cdot dt \cdot \left( \rho_{n^+} \frac{l_{n^+}}{d} + \rho_{n^+} \frac{l_{n^+}}{d} + \rho_{n^+} \frac{l_{n^+}}{d} + \rho_{n^+} \frac{l_{n^+}}{d} \right)}{C \cdot \rho^* \cdot S^2} \quad (48)$$

Для оценок дополнительного разогрева от протекания ионизационного тока используем значения тока и длительности его протекания из рисунка 41. Получим, что даже при протекании тока, образованного в результате воздействия импульсного гамма-излучения со значением мощности экспозиционной дозы гамма-излучения  $10^{12}$  Р/с, дополнительный разогрев не превысит одного градуса. Такое низкое значение объясняется низким временем протекания тока и относительно большой областью, по которой течет ток, в отличие от случая нормального функционирования, когда ток течет через малый по размерам канал транзистора.

На рисунке 42 показаны полученные при помощи данной модели распределения концентрации носителей заряда  $N$  (электронов и дырок) в трех

наиболее интересных сечениях элементарной ячейки структуры: в области расположения перехода  $p^+-n^-$  (вертикальное сечение А – см. рисунок 42а), в области чередования переходов  $n^+-p$  и  $p-n^-$  (вертикальное сечение В – см. рисунок 42б) и в области расположения канала (горизонтальное сечение С – см. рисунок 42в). На рисунке 42 для всех сечений показано изменение концентрации носителей в выбранном сечении до облучения и при воздействии импульсного гамма-излучения со значениями мощности дозы  $P_\gamma = 10^5$  и  $P_\gamma = 10^{12}$  Р/с [46].

Из рисунка 42 видно, что при облучении импульсом гамма-излучения с небольшим значением мощности экспозиционной дозы гамма-излучения ( $P_\gamma = 10^5$  Р/с) концентрация неосновных носителей в каждой области увеличивается вследствие генерации, но все же остается значительно меньше концентрации основных носителей. Данное изменение приведет к изменению в работе прибора в виде протекания ионизационных токов, но амплитуда данных токов мала и не приведет к необратимым изменениям. После прекращения действия импульса сгенерированные носители полностью рекомбинируют и работа прибора возобновится. При воздействии импульса гамма-излучения со значением  $P_\gamma = 10^{12}$  Р/с количество сгенерированных неосновных носителей становится сравнимым с количеством основных носителей в области, то есть происходит «заливание»  $p-n$  перехода и нарушается работа прибора так, что даже последующая рекомбинация не приведет к возобновлению нормальной работы прибора, то есть будут наблюдаться необратимые явления.

Из рисунка 42 также видно, что наибольшее влияние облучение оказывает на переход  $p-n$  область дрейфа в стоке, именно реакция этого перехода в основном будет определять реакцию всего транзистора на облучение. При уточнении SPICE модели данный вывод позволил ограничиться введением в эквивалентную схему элементов, описывающих реакцию данного перехода на облучение.

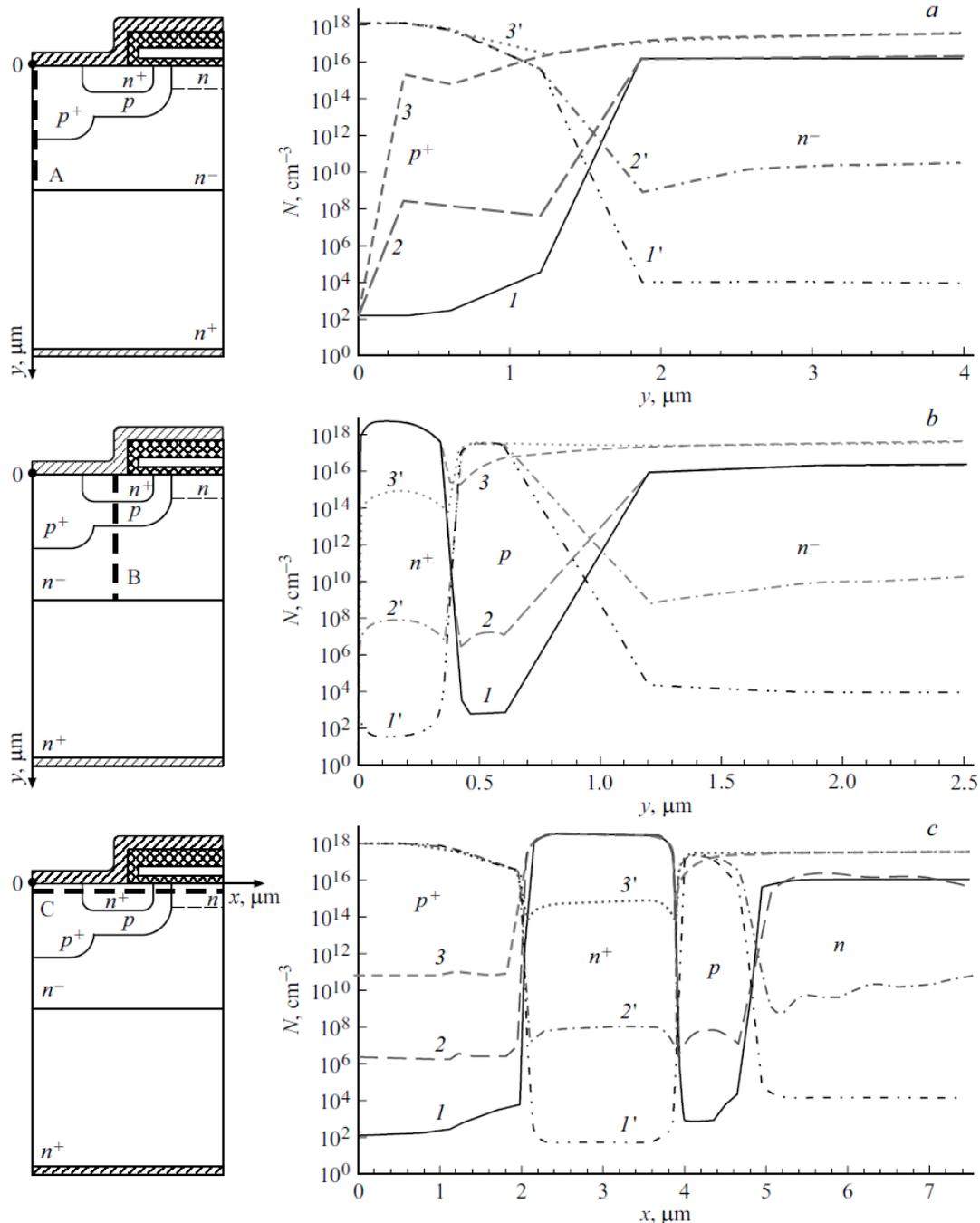


Рисунок 42 – Изменение в момент воздействия импульса гамма-излучения концентрации ( $N$ ) электронов (1-3) и дырок (1'-3') в сечениях А (а), В (b), С (c): 1, 1' – до облучения, 2, 2' –  $P_\gamma = 10^5$  Р/с, 3, 3' –  $P_\gamma = 10^{12}$  Р/с.

Таким образом, предложенная комплексная модель позволяет определять ключевые конструктивные параметры двумерной полупроводниковой структуры ДМОП-транзисторов и проводить моделирование их электрических параметров, в том числе в условиях

нестационарного гамма-облучения. Такой подход имеет преимущества перед использованием традиционных схемотехнических моделей, так как позволяет использовать известные данные о параметрах полупроводниковых слоев, в том числе, в условиях радиационного воздействия, что повышает достоверность получаемых результатов.

Полученные в работе результаты применены для доработки SPICE-модели рассматриваемого транзистора с целью расширения области применения данной модели.

### **Выводы по главе 3**

В главе описана разработанная физико-топологическая модель мощного вертикального ДМОП-транзистора, при этом:

- для задания исходных данных использовалось технологическое моделирование, которое применялось для решения обратной задачи. В результате моделирования процесса изготовления транзистора получали параметры его двумерной поперечной структуры.

- для учета воздействия импульса гамма-излучения использован встроенный оператор генерации носителей в полупроводнике при воздействии светового излучения. Ввиду того, что импульсное гамма-излучение, как известно, как раз и приводит к возникновению дополнительных электронно-дырочных пар в материалах прибора, то в данном случае применение данного оператора в целях учета импульса гамма-излучения обосновано.

- полученные в результате моделирования ВАХ лежат в диапазоне для выборки транзисторов, определенном экспериментально. Следовательно, примененный комплекс из физико-топологического и технологического типов моделирования позволяет разработать модель, описывающую работу транзистора исследуемого типа в нормальных условиях.

- физико-топологическая модель мощного вертикального ДМОП-транзистора, разработанная с использованием технологического моделирования, позволяет предсказывать амплитуду ионизационного тока транзистора и длительность протекания такого тока. Определение данных величин имеет важное прикладное значение, так как позволит при конструировании схемы на основе данного элемента учесть возможное возникновение радиационно-индуцированных токов в цепи с данным транзистором.

- для иллюстрации порядка величины ионизационного тока при воздействии импульса гамма-излучения с различным значением максимальной мощности экспозиционной дозы проведено моделирование. Определено, что величина ионизационного тока начинает превышать допустимое значение рабочих токов при воздействии импульсного гамма-излучения со значением максимальной мощности экспозиционной дозы начиная с  $\sim 5 \cdot 10^{11}$  Р/с.

- проведен анализ изменения концентрации носителей заряда в структуре прибора при воздействии импульсного гамма-излучения со значениями мощности дозы от  $P_\gamma = 10^5$  и до  $P_\gamma = 10^{12}$  Р/с. Определен уровень, при котором изменения в работе прибора будут носить необратимый характер, то есть произойдет отказ.

- показано, что наибольшее влияние облучение оказывает на переход  $p-n$  область дрейфа в стоке, именно реакция этого перехода в основном будет определять реакцию всего транзистора на облучение. При разработке SPICE - модели данный вывод позволил ограничиться введением в эквивалентную схему элемента, описывающего реакцию данного перехода на облучение.

- применен комплекс из трех типов моделей: технологического для задания структуры транзистора, физико-топологического для проведения подробного анализа физических процессов, протекающих в приборе при облучении гамма-излучением.

## **Глава 4 Технологическая модель мощного вертикального ДМОП-транзистора**

Четвертая глава описывает процесс разработки технологической модели мощного вертикального ДМОП-транзистора. Необходимость применения данного метода определяется следующим. В транзисторе рассматриваемого типа распределение примеси в основных рабочих слоях структуры формируется с помощью ионного легирования и имеет сложный и неоднородный характер, как по глубине, так и в латеральном направлении. Кроме того, протекание токов в транзисторе при воздействии импульса гамма-излучения задействует такие области полупроводниковой структуры, которые в штатном режиме работы являются диэлектрическими и/или слабо проводящими. Поэтому для корректного задания исходных данных и, как следствие, для построения достоверной модели важно воссоздать все рабочие области, ответственные за рассматриваемые эффекты, со сложным распределением примеси в каждой.

Для восстановления структуры исследуемого прибора был применен метод воспроизводства технологии изготовления мощных вертикальных ДМОП-транзисторов, изготавливаемых методом двойной диффузии. При этом параметры техпроцесса, такие как доза и энергия имплантации, время и температура диффузии и др. были рассчитаны, исходя из известных зависимостей, приведенных в литературе, для соответствия выходным электрическим параметрам и характеристикам реального прибора, а также геометрическим размерам структуры, полученным экспериментально.

В ходе восстановления структуры в среде технологического моделирования были воспроизведены только основные этапы технологического процесса данной технологии, ответственные за создание рабочих областей, в которых в дальнейшем необходимо учитывать воздействие импульса гамма-излучения. Некоторые этапы, имеющиеся в реальной технологии, не воспроизводились при моделировании, так как

целью работы было создание структуры транзистора, максимально соответствующей экспериментально определенной, а не разработка технологии изготовления данного прибора.

В п. 4.1 приведены полученные геометрические размеры структуры рассматриваемого транзистора, необходимые в качестве исходных данных, для проведения технологического моделирования. Информации, необходимой для построения физико-топологической модели, в технических условиях на транзисторную сборку не приведено, поэтому были проведены экспериментальные исследования по определению геометрических размеров структуры. Исследования проводились сотрудниками ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина».

В п. 4.2 отражены вопросы воспроизведения технологии изготовления и подбора параметров технологии для соответствия геометрическим размерам структуры и ВАХ, которые данная структура реализует.

В п. 4.3 приведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Показано, что в результате проведения технологического моделирования удалось создать структуру транзистора, геометрические параметры которой с относительной погрешностью 5 % соответствуют реальным размерам структуры, а ВАХ, полученные в результате моделирования, лежат в диапазоне для выборки транзисторов, определенном экспериментально.

4.1 Экспериментальные данные о структуре, необходимые для построения модели

Объектом исследований являются транзисторные сборки, состоящие согласно ТУ из двух кремниевых эпитаксиально-планарных полевых с изолированным затвором мощных переключательных транзисторов с n-каналами, не связанных между собой выводами, в металлокерамических корпусах.

Исследуемая сборка была раскорпусирована. На рисунке 43 приведена фотография транзисторной сборки после вскрытия, полученная при помощи оптического микроскопа, на вставке к данному рисунку показано расположение выводов согласно ТУ.

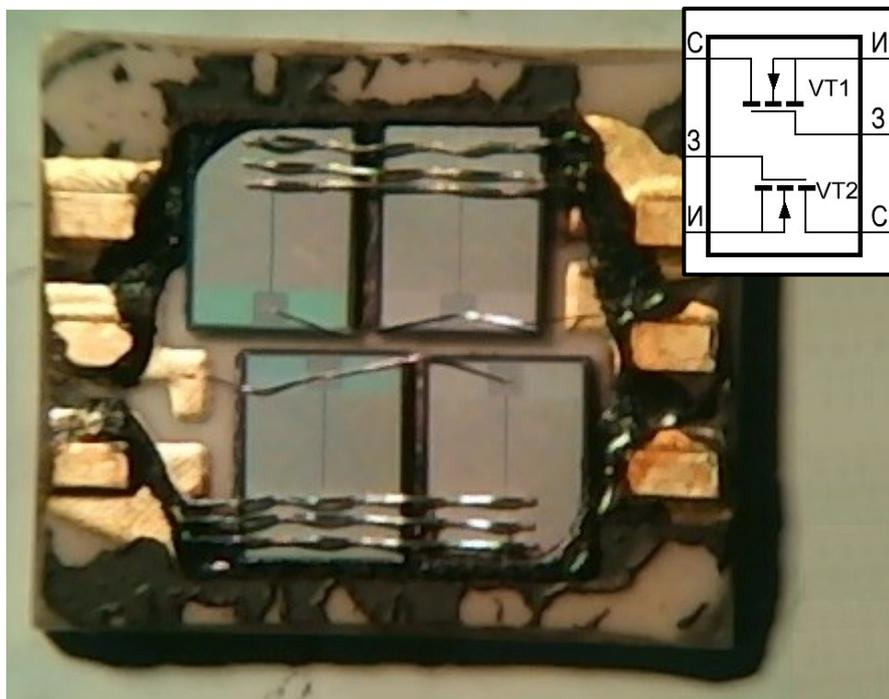


Рисунок 43 – Транзисторная сборка после вскрытия

Из рисунка 43 видно, что каждый транзистор состоит из двух пластин. На рисунке 44 показана фотография одной такой пластины, полученная при помощи оптического микроскопа. В результате таких исследований было определено, что такая пластина имеет габаритные размеры 3 мм × 4 мм. Для более подробного рассмотрения данной пластины с целью получения большего увеличения был использован электронный микроскоп, полученное с его помощью изображение данной пластины сверху представлено на вставке к рисунку.

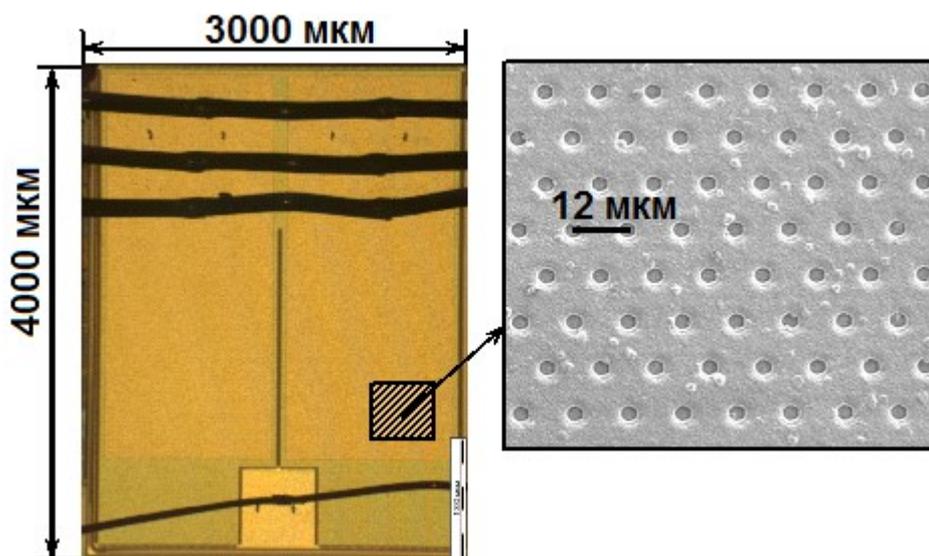
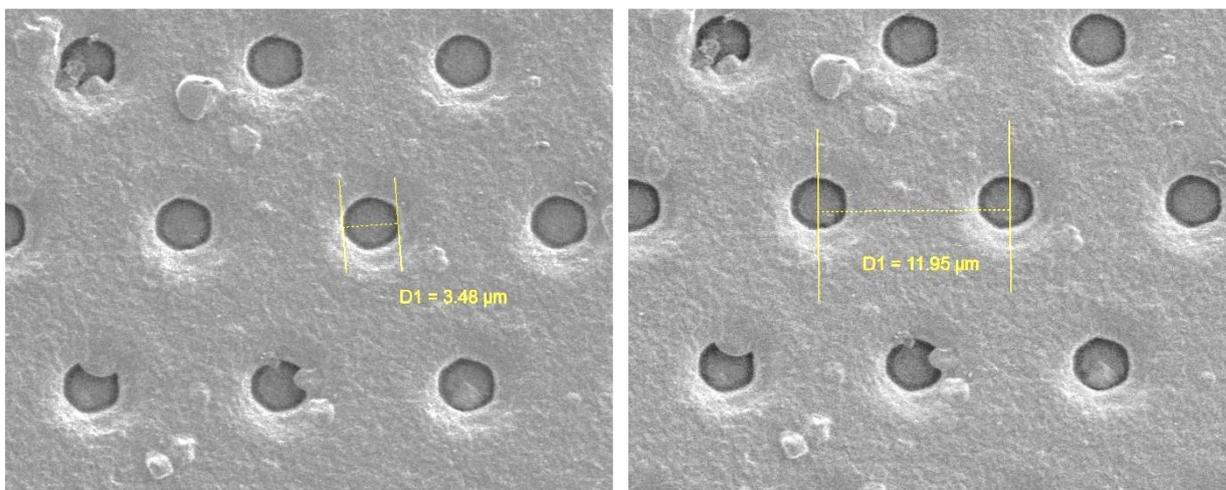


Рисунок 44 – Пластина транзистора (вид сверху)

Из рисунка 44 видно, что пластина транзистора состоит из периодически повторяющихся шестиугольников, следовательно, транзистор изготовлен методом двойной диффузии по технологии HEXFET. Измеренные значения расстояний между двумя противоположными сторонами шестиугольников и между их центрами, равны соответственно ~3,5 мкм (рисунок 45а) и ~12 мкм (рисунок 45б).



а)

б)

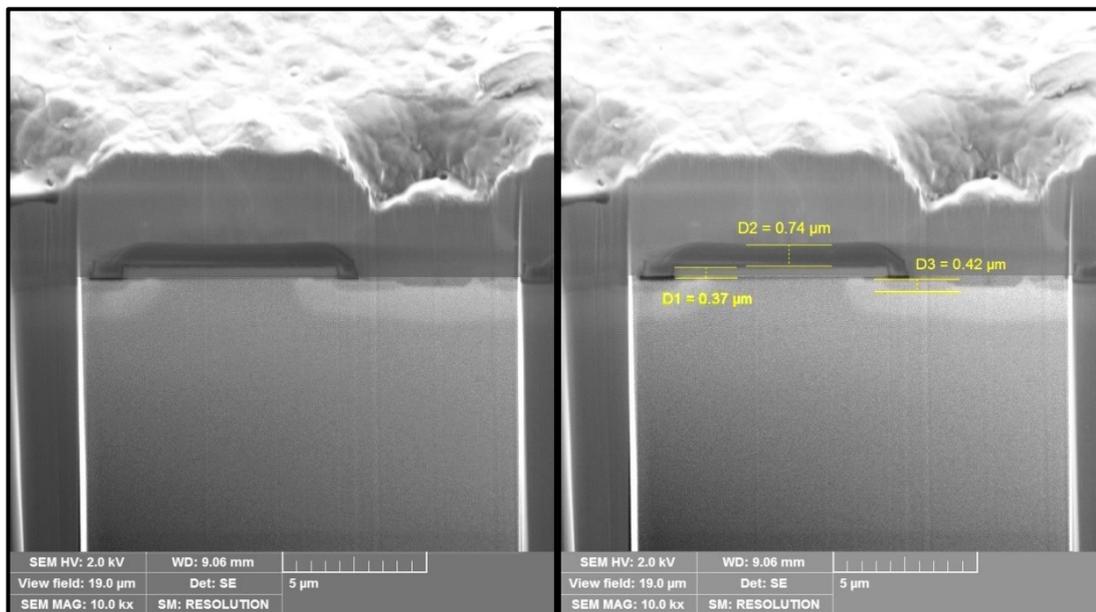
Рисунок 45 – Характерные размеры транзистора

Ввиду периодичности структуры исследуемого транзистора, достаточно рассмотреть структуру его периодически повторяющейся единичной ячейки, заключенной между серединами шестиугольников, а затем масштабировать полученную структуру.

Согласно рисунку 45б длина единичной ячейки составляет  $\sim 12$  мкм. Так как размеры одной пластины составляют  $3000$  мкм  $\times$   $4000$  мкм, то таких элементарных ячеек в одной пластине содержится  $\frac{3000}{12} \times \frac{4000}{12} = 250 \times 333 = 83250$  ячеек. Кроме того, как было показано выше, в данном случае каждый транзистор состоит из двух таких пластинок, поэтому количество ячеек в составе транзистора вдвое больше ( $83250 \times 2 = 166500$ ).

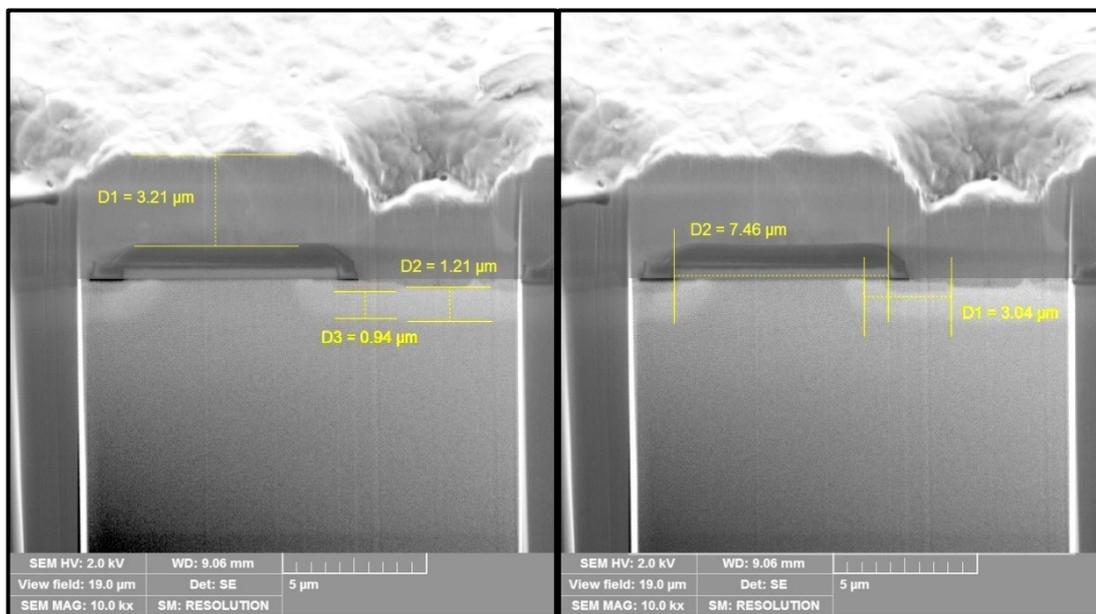
Для определения структуры единичной ячейки на сколе пластины транзистора ионным пучком был получен поперечный разрез единичной ячейки. Фотография структуры в данном разрезе, полученная при помощи электронного микроскопа, приведена на рисунке 46а, из которого видно, что данный транзистор не имеет V-образного затвора и, следовательно, является ДМОП-транзистором.

Целью проведения таких исследований было определение численных значений характерных областей структуры для возможности построения корректной физико-топологической модели. На рисунках 46б, 46в и 46г показано изображение того же поперечного разреза с экспериментально определенными размерами областей.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 46 – Геометрические размеры характерных областей структуры исследуемого транзистора

Таким образом, в результате исследований структуры данного транзистора были получены все размеры характерных областей структуры исследуемого транзистора, которые схематично обозначены на рисунке 47.

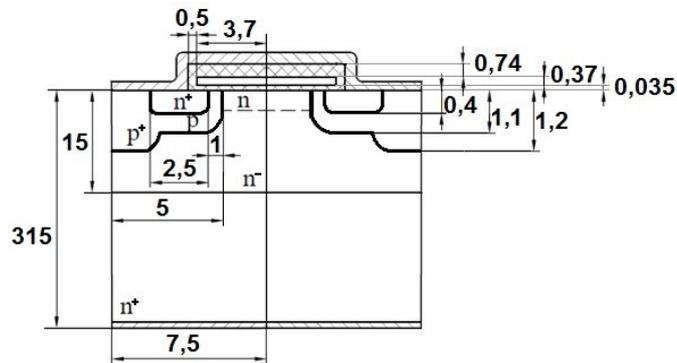


Рисунок 47 – Схематичное изображение единичной ячейки мощного вертикального ДМОП-транзистора с указанием размеров областей

Таким образом, с помощью проведенных исследований были определены все необходимые для построения физико-топологической модели значения геометрических размеров характерных областей структуры исследуемого транзистора. Все полученные значения хорошо согласуются с литературными данными о транзисторах, произведенных по такой технологии.

#### 4.2 Восстановление структуры ДМОП-транзистора с помощью технологического моделирования

Для разработки физико-топологической модели исследуемого транзистора, учитывающей изменения в работе данного транзистора при воздействии импульса гамма-излучения, необходимо как можно более точно задать структуру. В данном случае структура содержит большое число областей со сложным неоднородным распределением примесей в каждой. И именно распределение носителей в данных областях определяет работу транзистора, как в нормальных условиях, так и при облучении. Поэтому с целью более корректного задания структуры было принято решение использовать технологическое моделирование.

При этом решалась обратная задача, которая заключалась в определении значений параметров технологии изготовления исследуемого транзистора по имеющимся в литературе данным о технологии с использованием экспериментальных данных о структуре и электрических характеристиках транзистора. Задание данных значений при проведении технологического моделирования приведет к созданию структуры, геометрические размеры и электрические характеристики которой соответствуют экспериментальным данным.

Значения глубин залегания р-п переходов определены в результате экспериментальных исследований. Значения концентраций носителей в основных областях структуры в качестве исходных значений принимались в соответствии с данными для зарубежных аналогов, а в дальнейшем подбирались для соответствия электрическим параметрам и характеристикам исследуемых образцов российского производства.

Итак, для создания структуры рассматриваемого транзистора при технологическом моделировании задавалась последовательность технологических операций, описанная в п. 1.1.3. Определение значений параметров технологии приведено ниже.

В первую очередь для воспроизводства структуры необходимо было определить толщину подложки и концентрацию носителей в ней. Толщина подложки была определена экспериментально и составила 300 мкм, а концентрация носителей подбиралась для соответствия характеристики измеренной. Из литературы известно, что данная величина обычно имеет значение приблизительно  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  [11]. Исходя из информации о структуре подбор данной величины к экспериментальным данным удобнее всего производить для характеристики  $I_c(-U_{си})$  при  $U_{зи}=0 \text{ В}$ . На рисунке 48 показана зависимость характеристики  $I_c(-U_{си})$  при  $U_{зи}=0 \text{ В}$  при различных значениях концентрации носителей в подложке  $N_d$ . Здесь и далее рассматривается ток единичной ячейки, так как транзистор вертикальный и значение тока масштабируется, а форма ВАХ при этом не меняется.

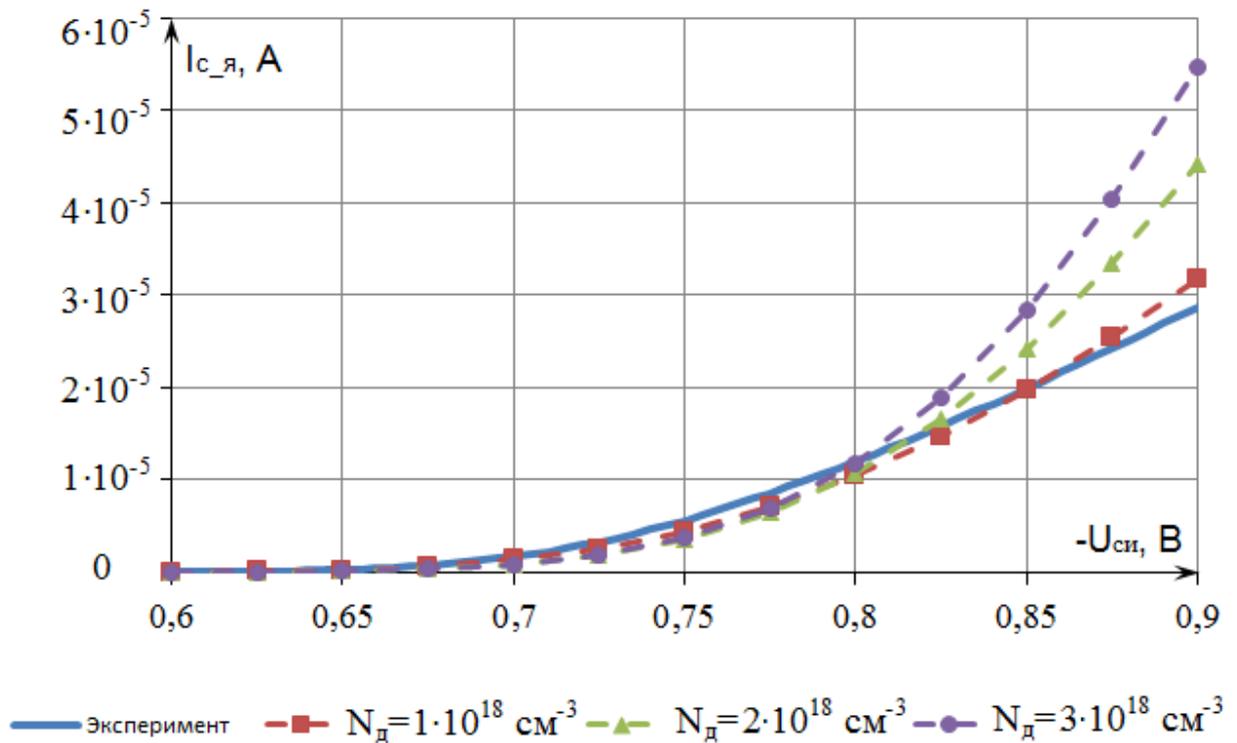


Рисунок 48 – Подбор величины концентрации носителей в подложке  $N_d$

Из рисунка 48 видно, что расчетная зависимость  $I_c(-U_{си})$  лучше всего описывает экспериментальную при концентрации примеси в подложке, равной  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Поэтому данная величина и использовалась в дальнейшем при разработке модели.

Далее согласно технологии на исходную пластину эпитаксиально наращивается n-дрейфовый слой. Толщина и концентрация эпитаксиального слоя определяют напряжение пробоя, что важно как при работе транзистора в нормальном режиме, так и при его работе при воздействии импульса гамма-излучения, ввиду того, что данная область будет определять ионизационный ток всего транзистора в связи с наибольшей площадью образованного ею с p-областью перехода. Для определения значения концентрации примеси в эпитаксиальном слое воспользуемся известной зависимостью пробивного напряжения от концентрации примеси в слое [38]. Известно, что лавинное умножение, или ударная ионизация, является наиболее важным механизмом пробоя p-n- переходов и напряжение лавинного пробоя определяет верхний предел напряжения стока МОП-транзисторов. В рассматриваемой структуре коллекторный переход представляет собой  $p^+ - n^- - n^+$  диод. В литературе [38] приводится рассчитанная зависимость напряжения пробоя таких диодов от концентрации примеси в слаболегированной области несимметричного резкого перехода в кремнии. Из данной зависимости с использованием имеющихся в технических условиях информации о максимально допустимом постоянном напряжении сток-исток  $U_{си \max} = 30 \text{ В}$ , приняв данное значение за напряжение пробоя  $V_{пр}$ , графическим способом были определены значения концентрации примеси в n-слое  $N_{пр} = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и ширины обедненной зоны  $W = 1 \text{ мкм}$ .

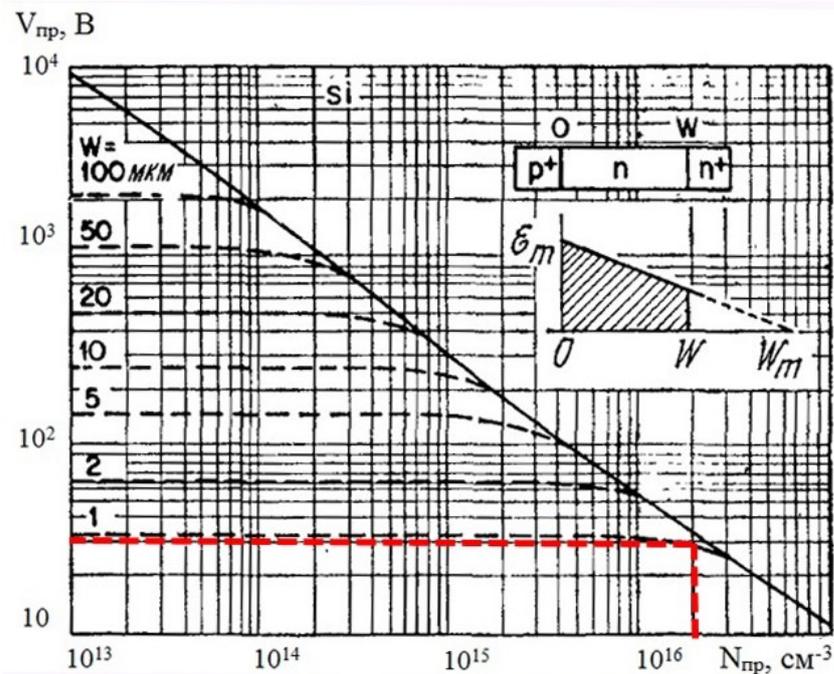


Рисунок 49 – Подбор концентрации примеси в  $n^-$ -слое

При задании значения толщины слаболегированной эпитаксиальной области необходимо помнить о том, что данное значение должно быть больше суммы значений глубины залегания коллекторного  $p-n^-$  перехода (1,2 мкм) и ширины обедненного слоя  $W = 1$  мкм.

В дальнейшем исходили из предположения, что для изготовления данного транзистора применялась готовая пластина с эпитаксиальным слоем. Согласно литературным данным [11] значение толщины эпитаксиального слоя на таких пластинах находится в диапазоне 8 – 15 мкм. Следовательно, при построении технологической модели значение данного параметра можно варьировать в указанных пределах для наилучшего совпадения с экспериментальными данными. Результаты такого подбора при помощи зависимости характеристики  $I_c(-U_{си})$  при  $U_{зи} = 0$  В показаны на рисунке 50.

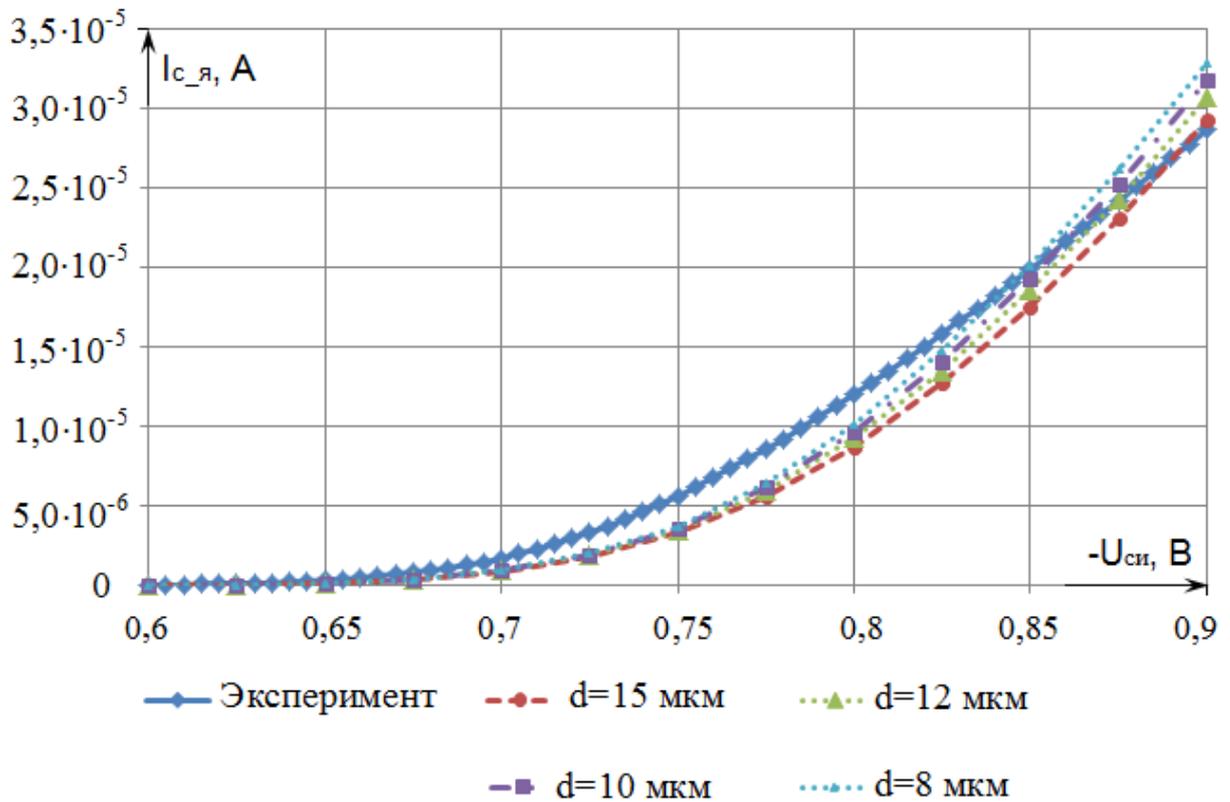


Рисунок 50 – Подбор толщины эпитаксиального слоя

Из рисунка 50 видно, что зависимость характеристики  $I_c(-U_{си})$  от толщины эпитаксиального слоя слабая ввиду малости вклада толщины данного слоя (8-15 мкм) в общую толщину пластины (315 мкм) и, соответственно, в сопротивление  $R_{си}$ . Поэтому значение толщины эпитаксиального слоя выбиралось по соответствию набору экспериментальных характеристик транзистора, наилучшее соответствие наблюдалось при  $d = 15$  мкм.

Следующими этапами технологии, параметры которых необходимо рассчитать, являются ионная имплантация и высокотемпературная диффузия. Формирование  $p^+$ -,  $p$ - и  $n^+$ -областей производится в два этапа: загонка примеси посредством ионной имплантации и разгонка примеси высокотемпературной диффузией. Параметрами данных этапов технологии являются: энергия  $E$  и доза  $Q$  имплантируемых в кремний атомов примеси, время  $t$  и температура  $T$  диффузии. Как уже было сказано выше, для

определения данных параметров решалась обратная задача, то есть по известным значениям конечных размеров основных областей и концентраций носителей в данных областях рассчитывались параметры технологии, применение которых позволит этих значений достичь. Ниже рассмотрим использованные в работе методы расчета данных параметров.

Так как в данном случае были известны как раз линейные размеры структуры, а об энергии имплантируемых атомов не было данных, то в качестве исходной задавалась глубина, на которую необходимо имплантировать ион, чтобы в конечном итоге получить требуемую структуру. При этом глубина, на которую имплантируется ион, не равна результирующей глубине залегания p-n перехода. Итоговые размеры получаются в результате производства всех этапов технологии. Поэтому задавались глубиной проникновения ионов в материал из расчета, что данная величина должна составлять лишь долю от итогового значения глубины залегания p-n перехода. Доля задаваемой глубины от итоговой варьировалась для соответствия электрических характеристик, получаемых в результате воспроизводства всех этапов технологии. Процесс подбора глубины являлся многоитерационным и трудоемким в связи с тем, что технология изготовления данного транзистора является многоэтапной и образована последовательностью чередования ионной имплантации и высокотемпературной диффузии атомов акцепторной и донорной примеси. В результате подбора было определено, что глубина, на которую необходимо имплантировать атомы бора составляет 0,6 мкм, а атомы мышьяка 0,04 мкм.

Величина  $R_p$  для каждого типа иона рассчитывалась в соответствии с выражением (1) (см. п. 1.1.3), в результате для мышьяка было получено значение 19 нм, а для бора – 326 нм. Каждое из данных значений сравнивалось со значениями  $R_p$  для выбранного атома примеси из таблицы 1 и находились энергия атомов  $E$ , имплантируемых в кремний, и среднеквадратичное отклонение среднего нормального пробега  $\Delta R_p$ ,

соответствующие наиболее близкому табличному значению  $R_p$ . Энергия ионов бора  $E_B=80$  кэВ, ионов мышьяка -  $E_{As}=20$  кэВ.

Доза облучения определялась согласно выражению (3) (см. п. 1.1.3). Значение дозы бора составило  $5,3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>, дозы мышьяка -  $7,4 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>.

Значение температуры, при которой производится диффузия, было принято равным 1100 °С как наиболее часто используемое на практике согласно литературным данным [11]. Как показано в п. 1.1.3, коэффициенты диффузии бора и мышьяка при данной температуре равны  $2,5 \cdot 10^{-13}$  и  $3,0 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/с соответственно (см. рисунок 13). Значения времени диффузии определялись по формулам (4) и (5). Вычисленное таким образом время диффузии бора 58 минут, время диффузии мышьяка – 37 минут.

При проведении технологического моделирования при помощи специализированного САПР была введена система координат с началом и направлением осей как показано на рисунке 51.

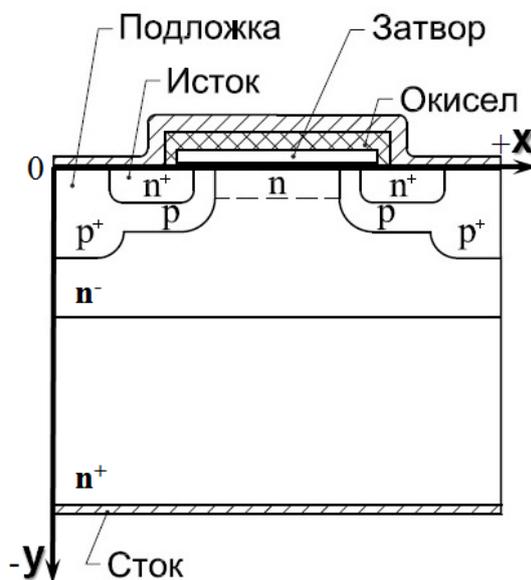


Рисунок 51 – Система координат, применяемая при моделировании

Таким образом, использованная при моделировании последовательность операций включает в себя:

- задание исходной кремниевой пластины толщиной 300 мкм с концентрацией примеси, равной  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>

*init c.phos=1.0e18 orientation=100 space.mult=2 DEPTH.STR=300*

- эпитаксиальное наращивание n<sup>-</sup>-слоя толщиной 15 мкм с концентрацией примеси  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> на высоколегированной исходной n<sup>+</sup>-пластине.

*epitaxy time=10 temp=1200 thickness=15.0\*

*divisions=15 dy=0.60 ydy=0.00 c.phos=2e16*

- создание окна шириной 1 мкм для создания p<sup>+</sup>-области, ширина которой после двух предстоящих этапов высокотемпературной диффузии должна составить согласно экспериментальным данным 2 мкм:

*deposit oxide thickness=1 div=1*

*deposit photores thickness=1 div=1*

*etch start x=0 y=-2.1*

*etch cont x=0 y=0*

*etch cont x=1.0 y=0*

*etch done x=1.0 y=-2.1*

- имплантация ионов бора для создания p<sup>+</sup> области значение энергии и дозы варьировалось при моделировании для совпадения результатов моделирования с экспериментальными данными. Значение дозы составило  $1,8 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, энергия ионов бора E<sub>B</sub>=60 кэВ:

*implant GAUSS boron dose=1.8e14 energy=60*

Удаление маски:

*etch photores all*

*etch oxide all*

- формирование при помощи фотолитографии защитного слоя изолятора над p<sup>+</sup>-областями и окна для подлегирования шириной 1,5 мкм в середине ячейки:

*deposit oxide thickness=1 div=1*

*deposit photores thickness=1 div=1*

*etch photores pl.x=5 right*

*etch oxide pl.x=5 right*

- подлегирование высокоомного n<sup>-</sup>-слоя донорной примесью в промежутках между p<sup>+</sup>- областями имплантацией Р для снижения R<sub>СИ отк.</sub>.  
Значение дозы фосфора составило  $2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>, энергия ионов фосфора E<sub>p</sub>=120 кэВ.

*implant GAUSS phos dose=2e12 energy=120*

Удаление маски:

*etch photores all*

*etch oxide all*

- Создание маски для первой диффузии:

*deposit oxide thickness=1 div=1*

*deposit photores thickness=1 div=1*

*etch start x=0 y=-4.1*

*etch cont x=2.0 y=-4.1*

*etch cont x=2.0 y=0*

*etch cont x=4.2 y=0*

*etch done x=4.2 y=-4.1*

- создание p-областей вокруг p<sup>+</sup>- областей ионной имплантацией акцепторной (В) примеси в открытые участки подложки с дальнейшей разгонкой методом диффузии.

*implant GAUSS boron dose=5.3e13 energy=80*

*ADAPT.PAR DIFF.LEN=0.1 SILICON I.BORON*

*diffuse time=58 temp=1100*

Удаление маски:

*etch photores all*

*etch oxide all*

- нанесение подзатворного диэлектрика толщиной 0,035 мкм, поликремниевого затвора толщиной 0,37 мкм и надзатворного диэлектрика толщиной 0,74 мкм в соответствии с экспериментальными данными:

*deposit oxide thickness=0.035 div=8*

*deposit poly thickness=0.37 div=16*

*deposit oxide thickness=0.74 div=16*

- Создание маски для второй диффузии

*deposit photores thickness=1 div=1*

*etch start x=0 y=-3.1*

*etch cont x=2.0 y=-3.1*

*etch cont x=2.0 y=0*

*etch cont x=3.7 y=0*

*etch done x=3.7 y=-3.1*

*etch photores pl.x=3.7 right*

- создание  $n^+$ -областей вокруг  $p^+$ - областей ионной имплантацией донорной (As) примеси в открытые участки подложки с дальнейшей разгонкой методом диффузии.

*implant GAUSS arsenic dose=7.4e14 energy=20*

*ADAPT.PAR DIFF.LEN=0.1 SILICON I.ARSENIC*

*diffuse time=37 temp=1100*

Удаление маски:

*etch photores all*

- нанесение на всю планарную поверхность подложки слоя  $SiO_2$ , вытравливание в межслойном изоляторе методом фотолитографии контактных окон над  $p^+$  и  $n^+$  - истоковыми областями, формирование электродов.

### 4.3 Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

В п. 4.1 представлены результаты экспериментальных исследований структуры ДМОП-транзистора, в ходе которых были получены размеры всех областей структуры. На рисунке 52 приведена структура, полученная в результате воспроизводства технологии, в сравнении с этими экспериментальными данными.

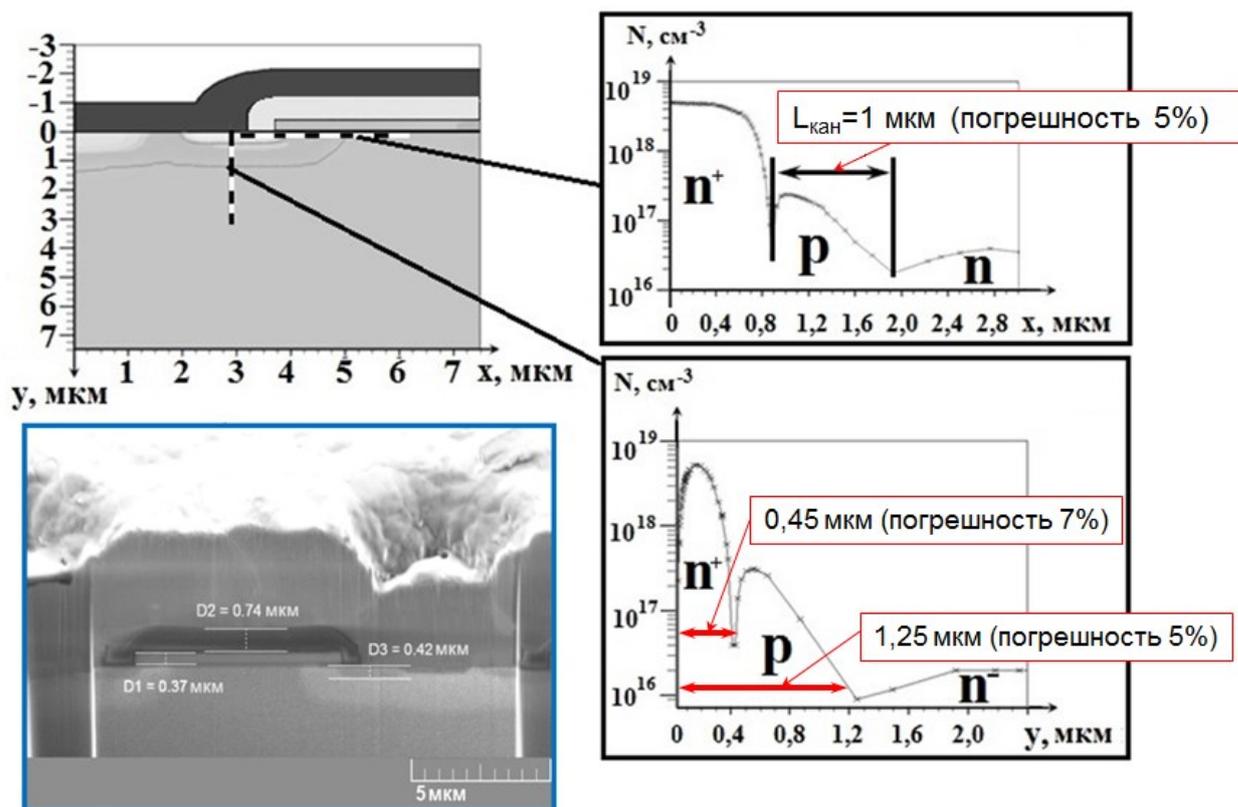


Рисунок 52 - Структура, полученная в результате воспроизводства технологии

Из рисунка 52 видно, что в результате технологического моделирования была получена структура, соответствующая реальной. Погрешность полученных геометрических размеров не превышает 10%. Кроме того, полученная структура воспроизводит электрические характеристики исследуемого транзистора (см. рисунок 37). Поэтому применение такой

структуры в качестве исходных данных позволило разработать наиболее точную физико-топологическую модель.

#### **Выводы по главе 4**

В главе описана разработанная технологическая модель мощного вертикального ДМОП-транзистора, при этом:

- приведены результаты экспериментальных данных по определению размеров структуры исследуемого транзистора, которые были необходимы для построения технологической модели. Показано, что транзистор состоит из  $\sim 10^5$  периодически повторяющихся ячеек. В ходе технологического моделирования воспроизводилась  $\frac{1}{2}$  элементарной ячейки транзистора для упрощения проведения расчетов.

- показана восстановленная структура транзистора путем воспроизведения основных этапов технологии изготовления транзистора в специализированном САПР. Показано определение параметров данной технологии для соответствия экспериментальным данным о структуре и электрическим характеристикам транзистора.

- показано, что в результате технологического моделирования была получена структура, соответствующая реальной. Погрешность полученных геометрических размеров не превышает 10 %. Кроме того, полученная структура воспроизводит электрические характеристики исследуемого транзистора как показано в главе 3.

## Заключение

Основные результаты диссертационной работы следующие:

1. Разработана технологическая модель процессов формирования структуры мощного вертикального ДМОП-транзистора, позволившая воспроизвести структуру, геометрические параметры которой с относительной погрешностью 10 % соответствуют реальным размерам структуры, а ВАХ, полученные в результате моделирования, лежат в экспериментальном диапазоне для выборки транзисторов. Полученные при помощи модели двумерные профили концентрации доноров и акцепторов в р-п переходах структуры исследуемого типа транзистора впервые позволили разработать достоверную физико-топологическую модель исследуемого типа транзистора в условиях облучения импульсным гамма-излучением.

2. Разработана физико-топологическая модель транспорта носителей заряда в мощном вертикальном ДМОП-транзисторе при воздействии импульсного гамма-излучения, позволившая определить, что при воздействии импульсного гамма-излучения с мощностью экспозиционной дозы  $P_\gamma$  до  $10^{11}$  Р/с значения ионизационных токов не выходят из области рабочих токов транзистора, а при воздействии импульсного гамма-излучения с мощностью экспозиционной дозы  $P_\gamma$  начиная с  $5 \cdot 10^{11}$  Р/с ионизационные токи превышают рабочие токи транзистора на время более 100 нс.

Вновь разработанная физико-топологическая модель дает возможность проводить оценки изменения транспорта электронов в активной области транзистора с погрешностью не более 30 % с учетом воздействия гамма-излучения со значениями мощности экспозиционной дозы вплоть до  $10^{12}$  Р/с.

Применение разработанной модели позволило определить необходимое количество элементов, которыми нужно дополнить эквивалентную схему, лежащую в основе SPICE модели исследуемого транзистора, а также зависимостей параметров этих элементов от воздействующего импульсного гамма-излучения.

3. Разработана SPICE-модель мощного вертикального ДМОП-транзистора, учитывающая его реакцию на воздействие импульсного гамма-излучения. Разработанная SPICE-модель позволяет оценивать его работу с погрешностью не более 30 % в условиях воздействия импульсного гамма-излучения со значением экспозиционной дозы вплоть до  $10^{12}$  Р/с. Разработанная модель может быть использована при моделировании схем на основе данного типа транзисторов и, в результате, для создания специальных радиотехнических схем защиты.

Сохранение разработанной SPICE- модели в виде самостоятельного элемента библиотеки позволило сократить время расчетов при проведении схемотехнического моделирования радиотехнической аппаратуры.

4. Впервые применен комплекс, состоящий из технологического, физико-топологического и схемотехнического типов моделирования, для исследования работы мощного вертикального ДМОП-транзистора в условиях воздействия импульсного гамма-излучения. Результаты расчетов хорошо коррелируют с экспериментальными данными, что позволяет сделать заключение об адекватности предложенной комбинированной модели. Предложенный подход использования указанного комплекса моделей также может быть применен для аналогичных ДМОП-транзисторов и других типов полупроводниковых приборов: биполярных транзисторов, МОП-транзисторов.

## Литература

- 1 Э.С. Окснер. Мощные полевые транзисторы и их применение: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985.
- 2 А. Керенцев, В. Ланин. «Конструктивно – технологические особенности MOSFET-транзисторов» // Силовая электроника, №1, 2008г.
- 3 В. Jayant Baliga. Advanced Power MOSFET Concepts. Springer Science+Business Media, LLC, 2010.
- 4 В. Войтович, А. Гордеев, А. Думаневич. Si, GaAs, SiC, GaN – силовая электроника. Сравнение, новые возможности // Силовая электроника, №5, с.4-10, 2010 г.
- 5 И. Шахнович. Твердотельные СВЧ-приборы. Состояние и перспективы // Электроника: Наука, технология, бизнес, №5, с. 58-64, 2005 г.
- 6 М. Гольцова. Мощные GaN-транзисторы. Истинно революционная технология // Электроника: Наука, технология, бизнес, №4 (00118), с. 86-100, 2012 г.
- 7 Е.А. Тарасова. Физико-топологическое моделирование электрофизических параметров и тепловых полей в GaAs и GaN НЕМТ структурах в условиях радиационного воздействия. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 2017 г.
- 8 А.С. Пузанов. Перенос электронов в транзисторных структурах в сильных резконеоднородных электрических полях при воздействии потока квантов высоких энергий. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 2011 г.
- 9 С. Зи. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн.1. Пер. с англ. М.: Мир, 1986.
- 10 С. Зи. Технология СБИС: В 2-х кн. Кн.2. Пер. с англ. М.: Мир, 1986.
- 11 А.И. Курносов, В.В. Юдин. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1986.

- 12 В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. Поверхностные радиационные эффекты в ИМС. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- 13 В.М. Кулаков, Е.А. Ладыгин, В.И. Шаховцов и др.; Под ред. Е.А. Ладыгина. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М.: Сов. Радио, 1980.
- 14 К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.
- 15 О.И. Лейпунский, Б.В. Новожилов, В.Н. Сахаров. Под ред. У. Я. Маргулис. Распространение гамма-квантов в веществе. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960.
- 16 В.Т. Громов. Введение в радиационную физику твёрдого тела. Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007.
- 17 А.П. Черняев. Ионизирующие излучения. М.: ИД КДУ, 2014.
- 18 Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1988.
- 19 А.Ю. Никифоров, В.А. Телец, А.И. Чумаков. Радиационные эффекты в КМОП ИС. – М.: Радио и связь, 1994.
- 20 Л.Н. Патрикеев, Б.И. Подлепецкий, В.Д. Попов. Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и интегральных схем. Учебное пособие. М.: Изд. МИФИ, 1975.
- 21 К.О. Петросянц, Л.М. Самбурский, И.А. Харитонов, А.П. Ятманов. Компактная макромодель КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты. // Известия вузов. Электроника, №1 (87), 2011 г.
- 22 И.А. Данилов, Б.В. Василегин, П.Н. Осипенко. Метод автоматизированного схемотехнического моделирования эффектов воздействия тяжелых заряженных частиц на современные КМОП КНС // ВАНТ, сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, № 4, 2011 г.

- 23 К.О. Петросянц, И.А. Харитонов, М.В. Кожухов, Л.М. Самбурский. Схемотехнические SPICE-модели биполярных и МОП-транзисторов для автоматизации проектирования радиационно стойких БИС // Информационные технологии, Т. 21, № 12, 2015 г.
- 24 В.С. Волков, А.П. Жарких, И.Н. Володин. Математические модели прогнозирования ионизационных эффектов в ИМС при воздействии радиации // Вестник ВГТУ, 5 (11), 2009.
- 25 К.В. Зольников, В.А. Скляр. Метод расчета тока ионизации для учета излучения в САПР сквозного проектирования СБИС // ВАНТ, сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, №2, 2014.
- 26 И.И. Абрамов. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005.
- 27 Ю.Ю. Гулин, А.Н. Рябев, М.Е. Горчичко. Разработка SPICE-моделей комплементарных биполярных транзисторов с учетом дозового воздействия // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, Т.3, № 4, 2016 г.
- 28 А.С. Аверяскин, А.В. Хананова. Математическое моделирование полупроводниковых элементов и функционирования схем на их основе после нейтронного облучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, №1, с. 46-50, 2012г.
- 29 А.С. Аверяскин, А.В. Хананова. Моделирование работы электронных схем при радиационном воздействии // Вестник Нижегородского Университета им. Н.И. Лобачевского, №2 (1), с. 52-55, 2013г.
- 30 А.С. Аверяскин, А.В. Хананова. Математическое моделирование работы биполярного транзистора и схемы на его основе в условиях воздействия нейтронного излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, №3, с.28-31, 2015г.

- 31 А.С. Аверяскин, А.В. Хананова. Создание и верификация SPICE-модели МОП-транзистора с учетом импульсного гамма-излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, №4, с. 16-19, 2014г
- 32 К.О. Петросянц, Е.В. Орехов, Л.М. Самбурский, И.А. Харитонов, А.П. Ятманов. Трехмерное моделирование радиационных токов утечки в субмикронных МОП-транзисторах со структурой кремний-на-изоляторе // Известия вузов. Электроника. №2(82), 2010г.
- 33 К.О. Петросянц, М.В. Кожухов. TCAD моделирование характеристик кремниевых и кремний-германиевых биполярных транзисторов с учетом радиационных эффектов // МЭС, № 4, 2016 г.
- 34 Е.А. Тарасова, Д.С. Демидова, С.В. Оболенский, А.Г. Фефелов, Д.И. Дюков. Моделирование мощных НЕМТ при облучении квантами высоких энергий // Физика и техника полупроводников, Т. 46, № 12, 2012 г.
- 35 А.С. Пузанов, Е.В. Волкова, С.В. Оболенский, С.Г. Петров. Применение квазигидродинамической модели для анализа электронного транспорта в полевых и биполярных транзисторах в условиях импульсного ионизирующего излучения с учетом повышенных температур // МЭС, №1, 2008г.
- 36 К.О. Петросянц, И.А. Харитонов, Е.В. Орехов, Л.М. Самбурский. Исследование стойкости к воздействию отдельных ядерных частиц ячеек КНИ КМОП ОЗУ методами смешанного 3D TCAD-SPICE моделирования // МЭС, № 1, 2012.
- 37 Andrei Vladimirescu and Sally Liu THE SIMULATION OF MOS INTEGRATED CIRCUITS College of Engineering University of California, Berkeley, 1980;
- 38 С. Зи. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х книгах. Кн. 2. Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. Изд. М.: Мир, 1984.
- 39 А.С. Аверяскин, А.В. Хананова. Методология интеграции моделей полупроводниковых приборов с учетом воздействия ионизирующих

излучений в САПР электронных схем // Сборник тезисов 20-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «СТОЙКОСТЬ-2017», 2017 г.

40 С.В. Оболенский, Н.В. Демарина, Е.В. Волкова. Основы физики полупроводников. Транспорт носителей заряда в электрических полях: Учебное пособие. Н.Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2007.

41 С. Зи. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. Изд. М.: Мир, 1984.

42 В.М. Лоборев, С.Ф. Перцев, В.В. Судаков, В.Е. Фортов, Б.А. Шилобреев. Физика ядерного взрыва. В 5 т. Том 1. Развитие взрыва. Изд. 3-е, с исправл./ Министерство обороны Российской Федерации. 12 Центральный научно-исследовательский институт. М.: Издательство физико-математической литературы, 2014.

43 Тарасова Е.А., Хананова А.В., Оболенский С.В., Земляков В.Е., Свешников Ю.Н., Егоркин В.И., Иванов В.А., Медведев Г.В., Смотрин Д.С. Исследование распределения электронов в GaN и GaAs структурах после  $\gamma$ -нейтронного облучения // Физика и техника полупроводников, т. 50, № 3, с. 331-338, 2016. (Tarasova E.A., Khananova A.V., Obolenskii S.V., Zemlyakov V.E., Sveshnikov Yu.N., Egorkin V.I., Ivanov V.A., Medvedev G.V., Smotrin D.S. Study of the Electron Distribution in GaN and GaAs after  $\gamma$ -Neutron Irradiation // Semiconductors. V. 50. № 3. 2016. P. 326-333.)

44 Тарасова Е.А., Оболенская Е.С., Хананова А.В., Оболенский С.В., Земляков В.Е., Егоркин В.И., Неженцев А.В., Сахаров А.В., Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Медведев Г.В. Теоретические и экспериментальные исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик НЕМТ структур и полевых транзисторов // Физика и техника полупроводников. Т. 50. № 12. 2016. С. 1599-1604. (Tarasova E.A., Obolenskaya E.S., Khananova A. V., Obolenskii S.V., Zemlyakov V.E., Egorkin V. I., Nezhentsev A. V., Sakharov A. V., Tsatsulynikov A. F., Lundin V. V.,

Zavarin E. E., Medvedev G. V. Theoretical and Experimental Studies of the Current–Voltage and Capacitance–Voltage of HEMT Structures and Field-Effect Transistors // Semiconductors. V. 50. № 12. 2016. P. 1599-1604.)

45 Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский, О.Е. Галкин, А.В. Хананова, А.Б. Макаров. Анализ параметров GaN-HEMT до и после гамма-нейтронного воздействия // Физика и техника полупроводников, 2017 г, т. 51, в. 11, с. 1543-1546.

46 А.В. Хананова, С.В. Оболенский. Разработка физико-топологической модели реакции мощного вертикального ДМОП транзистора на воздействие импульсного гамма-излучения // Физика и техника полупроводников, 2018 г, Т.52, в.№11, с. 1366-1372