

Разработка физико-топологической модели реакции мощного вертикального ДМОП транзистора на воздействие импульсного гамма-излучения

© А.В. Хананова^{1,2}, С.В. Оболенский^{1,¶}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

² РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, 456770 Снежинск, Россия

¶ E-mail: obolensk@rf.unn.ru

(Получена 25 апреля 2018 г. Принята к печати 7 мая 2018 г.)

Впервые предложен метод разработки моделей полупроводниковых приборов с двумерными неоднородными профилями концентрации доноров и акцепторов в рабочих областях полупроводниковой структуры прибора на основе комплекса физико-топологического моделирования транспорта носителей заряда и технологического моделирования процессов формирования структуры прибора. Применение технологического моделирования обусловлено необходимостью корректного определения параметров полупроводниковой структуры прибора, которые используются в качестве исходных данных для проведения расчетов транспорта электронов по физико-топологической модели. Для мощного МОП транзистора, создаваемого методом двойной диффузии, по известным электрическим характеристикам и измеренным геометрическим размерам структуры определялись параметры технологических процессов ионной имплантации, диффузии и литографии, которые уточнялись в ходе технологического моделирования. В результате были получены двумерные профили распределения доноров и акцепторов в $p-n$ -переходах, необходимые для проведения расчетов процессов пробоя транзистора при воздействии импульсного γ -излучения. Процессы пробоя моделировались с помощью физико-топологической модели на основе уравнений Пуассона, непрерывности и выражений для плотности диффузионного и дрейфового токов в транзисторе. Учет образовавшихся в момент γ -облучения носителей заряда был реализован введением зависимости коэффициента генерации электронно-дырочных пар от мощности дозы излучения. Результаты расчетов хорошо коррелировали с экспериментальными данными, что позволило сделать заключение об адекватности предложенной комплексной модели.

DOI: 10.21883/FTP.2018.11.46600.22

1. Введение

При разработке электронных схем специального назначения необходимо определять отклонения от штатного характера функционирования в момент и после радиационного облучения [1–3]. Для решения указанной задачи обычно используют методы моделирования на основе эквивалентной схемы транзисторов и сводят задачу к решению системы уравнений Кирхгофа [4–6]. При этом полупроводниковые приборы заменяются эквивалентными схемами различной степени детализации (SPICE-модели) [6–8]. Для всех основных типов полупроводниковых приборов разработаны эквивалентные схемы, позволяющие учитывать дефектообразующее радиационное воздействие на полупроводниковые структуры путем изменения параметров элементов указанных схем замещения [6,7,9,10]. Для учета ионизационных токов в схемы вводят дополнительные сопротивления и(или) генераторы, параметры которых зависят от времени. 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. В качестве объекта исследований в работе был выбран мощный вертикальный МОП

(металл–оксид–полупроводник) транзистор, создаваемый методом двойной диффузии (далее по тексту ДМОП транзистор). Данный вид транзисторов активно применяется при разработке электронных приборов ввиду следующих преимуществ [11]:

- 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 (металл–диэлектрик–полупроводник) 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.

Для исследуемого транзистора SPICE-модель с учетом реакции данного транзистора на импульсное γ -излучение была разработана ранее [12], 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, основанные на решении базовых уравнений физики полупроводников [13–16]. Такие модели наиболее полно описывают физические процессы, протекающие в приборе и, как следствие, имеют преимущество перед описанными выше SPICE-моделями при оценке реакции прибора на радиационное воздействие. Методы учета радиационного воздействия в указанном подходе известны [13–16], однако в данных работах ДМОП транзистор рассмотрен не был.

При использовании такого подхода для разработки модели нужны данные о геометрических размерах и уровнях легирования областей полупроводниковой структуры транзистора, а также электрофизические параметры материалов структуры, такие как подвижности и времена 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 результате моделирования процесса изготовления транзистора получали параметры его двумерной поперечной структуры. Указанная процедура итерационно повторялась несколько раз, что позволило уточнить решение.

Необходимость применения данного метода определяется следующим. В транзисторе рассматриваемого типа распределение примеси в основных рабочих слоях структуры формируется с помощью ионного легирования, имеет сложный и неоднородный характер, как по глубине, так и в латеральном направлении. Кроме того, протекание токов в транзисторе при воздействии импульса γ -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.

Разработка физико-топологической модели в дальнейшем позволит уточнить разработанную ранее SPICE-модель исследуемого ДМОП транзистора с учетом импульсного γ -излучения [12]. Подобный подход рассмотрен в работе [17], 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.

2. Исходные данные

Объектом исследований являлся кремниевый эпитаксиально-планарный транзистор из состава транзисторной сборки, при этом транзисторы в данной сборке являются независимыми элементами, поэтому каждый из них может быть рассмотрен отдельно. В технических условиях на транзисторную сборку необходимой для построения физико-топологической модели информации не приведено, поэтому были проведены экспериментальные исследования по определению геометрических размеров структуры. В ходе данных исследований транзисторная сборка была раскорпусована, было получено ее изображение в оптическом микроскопе (см. рис. 1).

При сравнении полученного изображения со схемой соединений электродов с выводами, приведенной в технических условиях на прибор (см. вставку в левом верхнем углу на рис. 1), было определено, что каждый из транзисторов сборки состоит из двух одинаковых пластин, имеющих размеры 3×4 мм. В последующем при помощи электронного микроскопа было получено увеличенное изображение поверхности пластины, в результате чего удалось определить, что структура прибора образована периодически повторяющимися элементарными ячейками в форме шестигранников, расположенными на расстоянии 12 мкм друг от друга

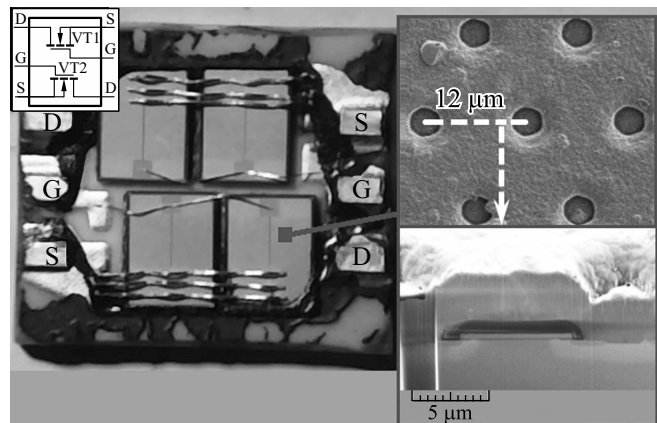


Рис. 1. Метод получения геометрических параметров структуры для ее воспроизводства методом технологического моделирования. S — исток, D — сток, G — затвор.

Размеры областей структуры

Параметр	n^+	p	p^+	Канал
Длина, мкм	2.5	3.5	1.5	1
Глубина, мкм	0.4	1.1	1.2	–

(см. верхнюю правую часть рис. 1). Таким образом, было определено, что в состав одного транзистора входят $\sim 1.6 \cdot 10^5$ элементарных ячеек. Затем на пластине транзистора был сделан скол, на котором при помощи электронного микроскопа ионным пучком был получен поперечный срез. На данном срезе были измерены все размеры областей исследуемой структуры, необходимые в качестве исходных данных для восстановления при помощи технологического моделирования структуры исследуемого транзистора. Полученные размеры приведены в таблице.

3. Технологическое моделирование

Для восстановления структуры исследуемого прибора был применен метод воспроизводства технологии изготовления мощных вертикальных ДМОП транзисторов, изготавливаемых методом двойной диффузии. Используемая при изготовлении именно этого прибора технология была неизвестна, однако в целом этапы такой технологии известны и описаны в литературе [18–21]. При этом параметры процесса, такие как доза и энергия имплантации, время и температура диффузии и др., были рассчитаны на основе известных зависимостей, приведенных в литературе [21], для оценки 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 γ -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. Используемая при моделировании последовательность операций включает в себя:

— эпитаксиальное наращивание n^- -слоя на высоколегированной исходной n^+ -пластине; 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 γ -излучения ввиду того, что данная область будет определять ионизационный ток всего транзистора

в связи с наибольшей площадью образованного ею с p -областью перехода;

— выращивание слоя изолятора на планарной поверхности с последующим формированием окон в данном слое и создание при помощи ионной имплантации в обнаженных участках эпитаксиального n^- -слоя высоколегированных p^+ -областей;

— окисление и последующее формирование при помощи фотолитографии защитного слоя изолятора над p^+ -областями, подлегирование высокоомного n^- -слоя донорной примесью (P) в промежутках между высоколегированными p^+ -областями имплантацией для снижения сопротивления сток–исток R_{ds} ;

— выращивание изолятора затвора толщиной ~ 0.035 мкм на планарной поверхности подложки в центральной зоне кристалла, нанесение поверх изолятора слоя поликремния толщиной ~ 0.37 мкм;

— удаление из прилегающих к высоколегированным p^+ -областям участков изолятора и затвора в центральной зоне структуры, создание p - и n^+ -областей вокруг p^+ -областей ионной имплантацией сначала акцепторной (B), а затем донорной (As) примеси в открытые участки подложки с дальнейшей разгонкой методом диффузии. (Эти операции являются наиболее ответственными для дальнейшего моделирования работы создаваемой структуры с учетом импульсного γ -излучения, так как в данных слоях не только происходит штатная работа прибора, но также именно в них протекают основные ионизационные процессы); нанесение на всю планарную поверхность подложки слоя SiO_2 , вытравливание в межслойном изоляторе методом фотолитографии контактных окон над истоковыми p^+ - и n^+ -областями, формирование электродов.

4. Физико-топологическая модель

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 [18]: уравнение Пуассона,

$$\text{div grad } \psi = (q/\varepsilon)(n - p - C), \quad (1)$$

уравнения непрерывности:

$$(\partial n / \partial t) - (1/q) \text{div } j_n = (G - R), \quad (2)$$

$$(\partial p / \partial t) - (1/q) \text{div } j_p = (G - R), \quad (3)$$

где ψ — электростатический потенциал, q — заряд электрона, ε — 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:

$$\begin{aligned} \mathbf{j}_n &= q n \mu_n \mathbf{E}_n + q D_n \nabla n, \\ \mathbf{j}_p &= q p \mu_p \mathbf{E}_p + q D_p \nabla p, \end{aligned} \quad (4)$$

где μ_n, μ_p — подвижности носителей, E_n, E_p — эффективные электрические поля, D_n, D_p — коэффициенты 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 $P_\gamma(t)$:

$$G(t) = g_0 P_\gamma(t), \quad (5)$$

где g_0 — константа образования электронно-дырочных пар в кремнии, $g_0 = 4.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{рад}^{-1}$.

Так как инструментарием среды технологического моделирования учет воздействия импульса γ -излучения не предусмотрен, то такой учет был произведен при помощи встроенного оператора генерации носителей в полупроводнике при воздействии светового излучения в соответствии с выражением (5). Ввиду того что импульсное γ -излучение, как известно, приводит к возникновению дополнительных электронно-дырочных пар в материалах прибора, применение в этом случае данного оператора в целях учета импульса γ -излучения обоснованно. Зависимость $P_\gamma(t)$ при этом задавалась в соответствии с экспериментальным импульсом γ -излучения.

5. Результаты моделирования

В связи со сложностью проведения расчетов электрических режимов целого транзистора моделирование проводилось для структуры единичной ячейки транзистора единичной толщины $d = 1 \text{ мкм}$, затем результаты масштабировались ввиду вертикальности структуры. В ходе проведенного технологического моделирования была получена структура, соответствующая реальной структуре прибора, определенной экспериментально. Концентрация носителей в полученной структуре в n^+ , p 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 18 транзисторов рассматриваемого типа из одной партии (см. рис. 2).

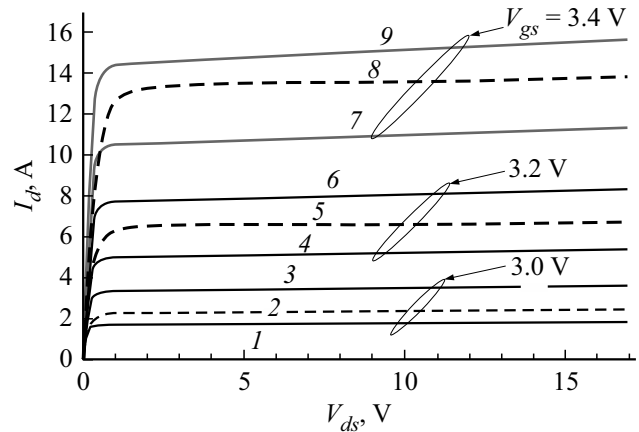


Рис. 2. Апробация модели ДМОП транзистора без учета радиационных эффектов: 1, 3 — верхняя и нижняя границы выборки в эксперименте при $V_{gs} = 3.0 \text{ В}$, 2 — расчет при $V_{gs} = 3.0 \text{ В}$; 4, 6 — верхняя и нижняя границы выборки в эксперименте при $V_{gs} = 3.2 \text{ В}$, 5 — расчет при $V_{gs} = 3.2 \text{ В}$; 7, 9 — верхняя и нижняя границы выборки в эксперименте при $V_{gs} = 3.4 \text{ В}$, 8 — расчет при $V_{gs} = 3.4 \text{ В}$.

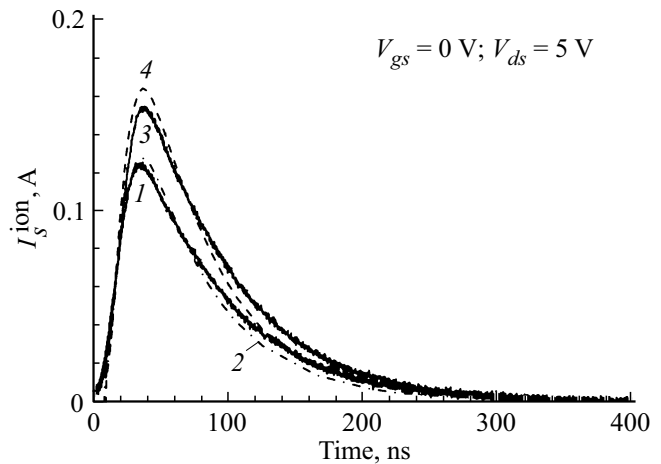


Рис. 3. Апробация модели — ионизационный ток транзистора в момент воздействия импульса γ -излучения: 1, 3 — эксперимент; 2, 4 — расчет. $P_\gamma = 5.8 \cdot 10^8 \text{ Р/с}$ (1, 2), $7.4 \cdot 10^8 \text{ Р/с}$ (3, 4).

Из рис. 2 видно, что полученные в результате моделирования ВАХ $I_d - V_{ds}$ лежат в диапазоне для выборки транзисторов, определенном экспериментально. Следовательно, примененный комплекс 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 I_S^{ion} при отсутствии

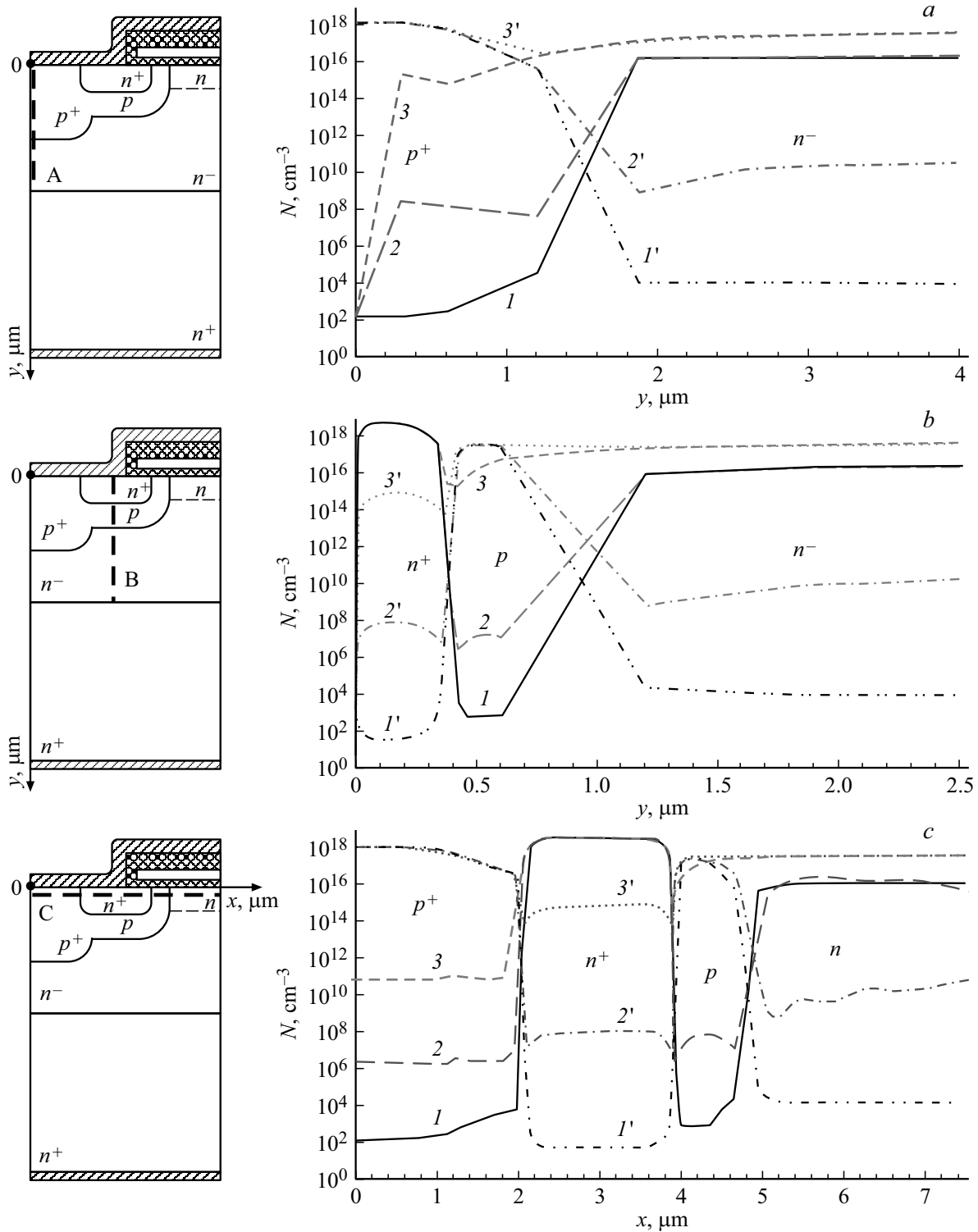


Рис. 4. Изменение в момент воздействия импульса γ -излучения концентрации (N) электронов ($1-3$) и дырок ($1'-3'$) в сечениях А (а), В (b), С (с): $1, 1'$ — до облучения; $2, 2'$ — $P_\gamma = 10^5$ P/c, $3, 3'$ — $P_\gamma = 10^{12}$ P/c.

управляющего напряжения, $V_{gs} = 0$, и при питающем напряжении $V_{ds} = 5$ В. Сравнение результатов моделирования с экспериментом приведено на рис. 3.

Рис. 3 иллюстрирует тот факт, что физико-топологическая модель мощного вертикального ДМОП транзи-

стора, 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 кон-

струировании схемы на основе данного элемента учесть возможное возникновение радиационно-индуцированных токов в цепи с данным транзистором.

На рис. 4 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. рис. 4, *a*), в области чередования переходов $n^+ - p$ и $p - n^-$ (вертикальное сечение В — см. рис. 4, *b*) и в области расположения канала (горизонтальное сечение С — см. рис. 4, *c*). На рис. 4 для всех сечений показано изменение концентрации носителей в выбранном сечении до облучения и при воздействии импульсного γ -излучения со значениями мощности дозы $P_\gamma = 10^5$ и 10^{12} Р/с.

Из рис. 4 видно, что при воздействии импульсом γ -излучения с небольшим значением мощности экспозиционной дозы γ -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 генерированные носители полностью рекомбинируют и работа прибора возобновится. При воздействии импульса γ -излучения со значением $P_\gamma = 10^{12}$ Р/с количество генерированных неосновных носителей становится сравнимым с количеством основных носителей в области, т.е. происходит „заливание“ $p - n$ -перехода и нарушается работа прибора так, что даже последующая рекомбинация не приведет к возобновлению нормальной работы прибора. Таким образом, будут наблюдаться необратимые явления.

Из рис. 4 также видно, что наибольшее влияние облучение оказывает на переход область $p - n^-$ дрейфа в стоке, именно реакция этого перехода в основном будет определять реакцию всего транзистора на облучение. В дальнейшем при уточнении SPICE-модели данный вывод позволит ограничиться введением в эквивалентную схему элементов, описывающих реакцию данного перехода на облучение.

6. Заключение

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 облучения импульсным γ -излучением. Такой подход имеет преимущества перед использованием традиционных схематических 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 будут применены для доработки SPICE-модели рассматриваемого транзистора с целью расширения области применения данной модели.

За предоставленные экспериментальные данные авторы выражают благодарность сотрудникам РФЯЦ–ВНИИТФ А.Н. Грецовой, С.М. Дубровских, П.С. Применко, О.В. Ткачеву, В.П. Шукайло.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-13-00066).

Список литературы

- [1] В.М. Кулаков, Е.А. Ладыгин, В.И. Шаховцов и др. *Действие проникающей радиации на изделия электронной техники* (М., Сов. радио, 1980).
- [2] К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. *Радиационные эффекты в кремниевых интегральных микросхемах космического применения* (М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012).
- [3] Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. *Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям* (М., Радио и связь, 1988).
- [4] К.О. Петросянец, Л.М. Самбурский, И.А. Харитонов, А.П. Ятманов. *Изв. вузов. Электроника*, **1** (87), 20 (2011).
- [5] И.А. Данилов, Б.В. Василегин, П.Н. Осипенко. *ВАНТ, сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*, **4**, 13 (2011).
- [6] К.О. Петросянец, И.А. Харитонов, М.В. Кожухов, Л.М. Самбурский. *Информационные технологии*, **21** (12), 916 (2015).
- [7] В.С. Волков, А.П. Жарких, И.Н. Володин. *Вестн. ВГТУ*, **5** (11), 64 (2009).
- [8] К.В. Зольников, В.А. Скляр. *ВАНТ, сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*, **2**, 14 (2014).
- [9] Ю.Ю. Гулин, А.Н. Рябев, М.Е. Горничко. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, **3** (4), 89 (2016).
- [10] А.С. Аверьякин, А.В. Хананова. *ВАНТ, сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*, **1**, 46 (2012).
- [11] Э.С. Окснер. *Мощные полевые транзисторы и их применение* (М., Радио и связь, 1985).
- [12] А.С. Аверьякин, А.В. Хананова. *ВАНТ, сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*, **4**, 16 (2014).
- [13] К.О. Петросянец, Е.В. Орехов, Л.М. Самбурский, И.А. Харитонов, А.П. Ятманов. *Изв. вузов. Электроника*, № 2, (82), 81 (2010).
- [14] К.О. Петросянец, М.В. Кожухов. *МЭС*, **4**, 2 (2016).
- [15] Е.А. Тарасова, Д.С. Демидова, С.В. Оболенский, А.Г. Феллов, Д.И. Дюков. *ФТП*, **46** (12), 1587 (2012).
- [16] А.С. Пузанов, Е.В. Волкова, С.В. Оболенский, С.Г. Петров. *МЭС*, **1**, 286 (2008).
- [17] К.О. Петросянец, И.А. Харитонов, Е.В. Орехов, Л.М. Самбурский. *МЭС*, **1**, 413 (2012).
- [18] В. Jayant Baliga. *Advanced Power MOSFET Concepts* (Springer Science + Business Media, LLC, 2010).

- [19] А. Керенцев, В. Ланин. Силовая электроника, **1**, 34 (2008).
[20] С. Зи. *Технология СБИС* (М., Мир, 1986).
[21] А.И. Курносов, В.В. Юдин. *Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем* (М., Высш. шк., 1986).

Редактор Л.В. Шаронова

Development of a physical–topological model of the reaction of a powerful vertical DMOS transistor to the pulsed gamma-irradiation

A.V. Khananova^{1,2}, S.V. Obolensky¹

¹Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

²All-Russia Research Institute of Technical Physics, 456770 Snezhinsk, Russia

Abstract A method for developing models of semiconductor devices with two-dimensional inhomogeneous profiles of donor and acceptor concentrations in the working regions of a semiconductor structure, based on a complex of physical–topological simulation of charge carrier transport and technological modeling of the device structure formation was proposed for the first time. Technological modeling was conditioned by the necessity to determine correctly the parameters of the semiconductor structure of the device, which are used as input data for the calculation of electron transport by the physical–topological model. For a powerful MOSFET created by the method of double diffusion, the known electrical characteristics and measured geometric dimensions of the structure determined the parameters of the technological processes of ion implantation, diffusion and lithography, which were refined in the course of technological modeling. As a result, two-dimensional distribution profiles of donors and acceptors in $p-n$ junctions were obtained, which are necessary for calculation of the processes of the transistor breakdown under the pulsed γ -irradiation. These breakdown processes were modeled using a physical–topological model based on Poisson’s equations, continuity and expressions for the density of diffusion and drift currents in a transistor. Accounting for the charge carriers formed at the time of γ -irradiation was realized by introducing the dependence of the electron–hole pairs generation coefficient on the radiation dose rate. The results of the calculations correlated well with the experimental data, which made it possible to conclude that the proposed integrated model was adequate.