

Кремниевый металл-оксид-полупроводник транзистор с зависимым контактом к карману и двухслойным поликремниевым затвором

© Т.А. Шоболова¹, А.С. Мокеев¹, С.Д. Рудаков¹, С.В. Оболенский^{1,2}, Е.Л. Шоболов¹

¹ Филиал ФГУП „РФЯЦ-ВНИИЭФ“ „НИИИС им. Ю.Е. Седакова“, 603137 Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022 Нижний Новгород, Россия

E-mail: shobolova.ta@mail.ru, obolensk@rf.unn.ru, shelv@inbox.ru

Поступила в Редакцию 12 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 19 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Проведено сравнение характеристик двух вариантов конструктивно-технологического исполнения кремниевых МОП-КНИ транзистора с контактом к подложке, совмещенным с истоком, с одним и двумя слоями поликремниевых затворов. По результатам численного моделирования показано, что транзисторы с двухслойным поликремниевым затвором имеют повышенную надежность, быстродействие и стойкость к ионизирующему излучению. Предложена самосовмещенная технология изготовления транзистора с зависимым контактом к карману и с двухслойным поликремниевым затвором, позволяющая реализовать транзисторы с большим отношением ширины к длине затвора (до 100 и более). Описанные конструктивно-технологические особенности изготовления транзистора дают возможность дополнительного управления каналом транзистора, улучшают его характеристики и расширяют область применения.

Ключевые слова: МОП-транзистор, КНИ, двухслойный поликремний, зависимый контакт к карману, „широкий“ транзистор.

DOI: 10.21883/FTP.2021.10.51444.48

1. Введение

К интегральным схемам (ИС), входящим в состав аппаратуры специального назначения, работающей в условиях воздействия внешних факторов (механических, климатических, специальных), предъявляются особые требования, к наиболее значимым из которых можно отнести следующие: уровень стойкости к воздействию особых факторов, миниатюризация, быстродействие, высокая надежность, малое энергопотребление, широкий диапазон рабочих температур и другие. Для достижения необходимых характеристик ИС применяют различные схемотехнические и конструктивно-технологические решения, одним из которых может быть увеличение ширины транзистора в направлении оси затвора до значений, в 100 раз превышающих расстояние исток-сток. В основном в технологии изготовления микросхем с проектными нормами 0.35 мкм используют элементы с W/L от 0.27 до 10, где W — ширина элемента ИС, L — его длина. Данные ограничения элементов связаны с особенностями операций фотолитографии, принципом увеличения интеграции элементов ИС и учетом изменения модуля напряженности электрического поля в слабо легированном слое кремния.

В элементах ввода-вывода микросхемы используются мощные транзисторы в качестве усилителей тока. Мощные транзисторы характеризуются высоким значением тока, что достигается увеличением ширины транзистора.

Отношение ширины транзистора к его длине является важной характеристикой, численное значение которого определяет геометрическую характеристику транзистора — количество квадратов. Таким образом, в элементах ввода-вывода микросхемы используют транзисторы с W/L от 10 до 100 (т.е. от 10 до 100 квадратов), такие транзисторы называются „широкими“.

Фирма Honeywell в 2002 г. опубликовала патент 6960810 В2, где описывается технология изготовления транзистора с двухслойным поликремниевым затвором [1]. Первый слой поликремния используется в качестве маски для формирования „охранных колец“ транзистора и способствует увеличению толщины слоя оксида кремния между вторым поликремнием и карманом транзистора, тем самым уменьшая паразитную емкость затвор-карман.

Предложенная технология изготовления транзистора способствует уменьшению напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике и тем самым приводит к уменьшению его напряжения пробоя и увеличению надежности. Данный эффект наблюдается благодаря рассовмещению края первого поликремниевых слоя и края кремниевого транзисторного островка [1].

„Охранное кольцо“ транзистора представляет собой легированный слой кремния, с концентрацией примеси, превышающей концентрацию кармана транзистора и располагающейся по краю кремниевого островка, между целевой изоляцией и самим транзистором. Основная

функция „охраны“ — уменьшение влияния положительных зарядов в щелевой изоляции, образовавшихся при радиационном воздействии. Таким образом, использование „охранных колец“ приводит к увеличению радиационной стойкости элементов схемы.

В данном патенте контакт к карману осуществляется посредством легированной области кремния под „охранным кольцом“. Таким образом, контакт к слаболегированному карману осуществляется с двух сторон транзисторной структуры, что исключает возможность использования данной технологии при изготовлении „широких“ транзисторов.

В данной статье описан способ изготовления оригинального транзистора с двухслойным затвором и зависимым контактом к карману, который позволяет получать „широкие“ транзисторы.

2. Общие положения

Транзистор с совмещенным с истоком контактом к карману или зависимым контактом представляет собой транзистор, где контакт к карману топологически находится на области истока [2].

На рис. 1 представлены структуры метал-окисел-полупроводник (МОП) транзисторов с однослойным (классическим) и двухслойным поликремниевым затвором (неклассическим). Овалами выделены области, где паразитная емкость „карман-затвор“ меньше, чем в областях, выделенных кружком. Данные области являются областями транзистора с повышенными напряженностями электрического поля.

В процессе изготовления транзисторной структуры с двумя слоями поликремния первый слой поликремния изначально используется в качестве маски формирования „охранного кольца“ транзистора, тем самым уменьшая влияние положительных зарядов, образовавшихся при γ -облучении в оксиде кремния, который окружает со всех сторон транзисторную структуру в качестве траншейной изоляции.

МОП-транзистор с совмещенным с истоком контактом к карману с двухслойным поликремниевым затвором обладает лучшими характеристиками, чем аналогичный классический транзистор. Транзистор с двухслойным поликремниевым затвором является более надежным, скоростным и стойким к воздействию особых факторов [1]. Повышенная надежность такого транзистора связана с уменьшением напряженности электрического поля в верхних углах кремниевого островка и в подзатворном диэлектрике. Высота поликремниевого затвора определяется технологией изготовления транзисторных структур.

Так как у транзистора с двухслойным поликремниевым затвором толщина оксида между поликремниевой шиной и контактом к карману h_{ox2} больше на толщину первого поликремния, чем у транзистора с однослойным

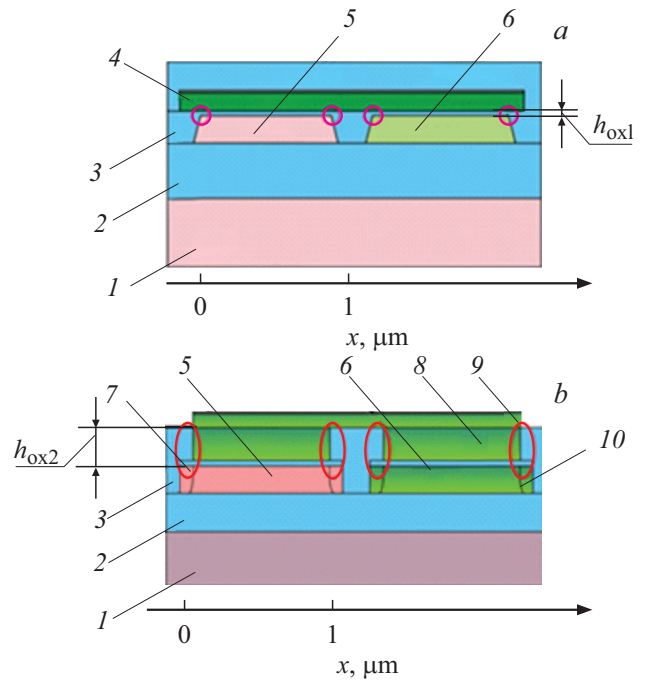


Рис. 1. Схематическое изображение поперечных сечений МОП-транзисторов с однослойным (а) и двухслойным (б) поликремниевым затвором: 1 — кремниевая подложка; 2 — слой захороненного оксида кремния; 3 — щелевая изоляция (оксид кремния); 4 — поликремниевая шина классического транзистора; 5 — p -карман n -МОП; 6 — n -карман p -МОП; 7 — p^+ -охрана n -МОП; 8 — первый слой поликремниевого затвора неклассического транзистора; 9 — второй слой поликремниевого затвора или поликремниевая шина неклассического транзистора; 10 — n^+ -охрана p -МОП. Овалами выделены проблемные области транзисторов. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

полыкремниевым затвором h_{ox1} (см. рис. 1), то, соответственно, паразитная емкость в первом случае меньше, чем во втором, так как отношение емкостей структур обратно пропорционально соотношению толщин оксида $h_{ox2}/h_{ox1} \approx 30$. Это сильно сказывается на скоростных характеристиках транзистора.

На рис. 2 приведены два варианта топологии транзисторов с совмещенным с истоком контактом к карману и с двухслойным поликремниевым затвором. Первый вариант (рис. 2, а) соответствует патенту [1], где контакты к карману расположены только на охранном кольце транзистора. Во втором варианте (предложенном нами, оригинальном, рис 2, б) топология включает контакты к карману не только на охранной области, но и в виде „вставки“ в области истока.

3. Физико-топологическая модель транзисторов

В данной статье сравниваются транзисторы с двухслойным поликремниевым затвором, которые отличаются

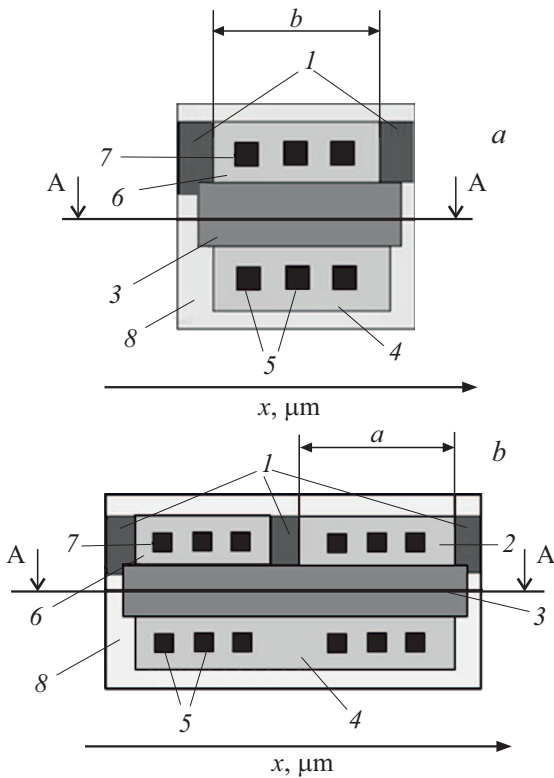


Рис. 2. Изображение топологии транзистора, предложенного в патенте [1] (a) и широкого оригинального транзистора (b): 1 — контакт к карману; 2, 6 — кремниевый легированный слой (исток транзистора); 3 — поликремниевый затвор; 4 — кремниевый легированный слой (сток транзистора); 5 — силицидированный контакт к стоку; 7 — силицидированный контакт к истоку; 8 — кольцевидная легированная область кремния — охранная область транзистора.

ся расстоянием между легированными областями кремния — контактами к подложке (см. рис. 2, a и b), а именно $a = 3.5$, $b = 7$ мкм. Остальные геометрические характеристики были одинаковыми.

Ширина оригинального и Honeywell транзисторов была выбрана 7 мкм. Такие транзисторы являются „широкими“, размером 20 квадратов (отношение ширины к длине транзистора).

В 3D модели оригинального транзистора шириной 7 мкм дополнительная вставка (контакт к карману) располагалась на расстоянии 3.55 мкм от края кремниевого островка.

Исследуемые транзисторы обладали следующими геометрическими характеристиками: длина поликремниевого затвора 0.35 мкм, длина LDD 0.1 мкм, истока/стока 0.1 мкм, ширина транзистора 7 мкм. Толщины слоев были выбраны согласно широко используемым в производстве микроэлектроники (МЭ) пластинам КНИ, где захороненный окисел и рабочий кремниевый слой составляют 0.2 мкм каждый, и выбранным проектным нормам.

Экспериментальные методы исследования являются не только дорогостоящими, времязатратными, но и порой недостаточными, возникает необходимость использования методов физико-математического моделирования с помощью ЭВМ [3].

В работе было проведено 3D моделирование МОП КНИ структур транзисторов с разными типами контактов к подложке, где концентрации легирования примесью одноименных кремниевых областей одного типа транзистора аналогичны другому. Необходимость проведения 3D моделирования объясняется тем, что 2D сечение транзистора является недостаточным для решения поставленной задачи — не может охватить необходимое для расчета влияние введения дополнительного контакта к карману на управляемость областью канала в транзисторе.

Математической основой TCAD является численное решение фундаментальной системы уравнений физики полупроводниковых приборов, которая для диффузионно-дрейфового механизма переноса носителей состоит из следующих уравнений:

$$\mathbf{j}_n = \mu_n \cdot (n \nabla E_c + k T_n \nabla n - n k T_n \nabla \ln \gamma_n + \lambda_n f^{td} k n \nabla T_n - 1.5 n k T_n \nabla \ln m_n); \quad (1)$$

$$\mathbf{j}_p = \mu_p \cdot (p \nabla E_c + k T_p \nabla p - p k T_p \nabla \ln \gamma_p + \lambda_p f^{td} k p \nabla T_p - 1.5 p k T_p \nabla \ln m_p); \quad (2)$$

$$j_{n, \text{surf}} = -q n s_n, \quad j_{p, \text{surf}} = -q n s_p; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi + \mathbf{P}) = -q(p - n + N_D - N_A) - \rho_{\text{trap}}, \quad (4)$$

$$R_{\text{net}}^{SRH} = \frac{np - n_{i, \text{eff}}^2}{\tau_n(n + n_1) + \tau_p(p + p_1)}; \quad (5)$$

$$n_1 = n_{i, \text{eff}} \cdot \exp\left(\frac{E_{\text{trap}}}{kT}\right), \quad p_1 = p_{i, \text{eff}} \cdot \exp\left(\frac{E_{\text{trap}}}{kT}\right); \quad (6)$$

$$R_{\text{net}}^A = (C_n n + C_p p) \cdot (np - n_{i, \text{eff}}^2); \quad (7)$$

$$R_{\text{surt, net}}^{SRH} = \frac{np - n_{i, \text{eff}}^2}{\frac{(n+n_1)}{s_p} + \frac{p+p_1}{s_n}}; \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j}_n = q R_{\text{net}, n} + q \frac{\partial n}{\partial t}, \quad -\nabla \cdot \mathbf{j}_p = q R_{\text{net}, p} + q \frac{\partial p}{\partial t}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial W_n}{\partial t} + \Delta \cdot \mathbf{S}_n = \mathbf{j}_n \cdot \frac{\nabla E_c}{q} + \frac{\partial W_n}{\partial t_{\text{coll}}}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial W_p}{\partial t} + \Delta \cdot \mathbf{S}_p = \mathbf{j}_p \cdot \frac{\nabla E_v}{q} + \frac{\partial W_p}{\partial t_{\text{coll}}},$$

$$\frac{\partial W_L}{\partial t} + \Delta \cdot \mathbf{S}_L = \frac{\partial W_L}{\partial t_{\text{coll}}}, \quad (11)$$

где (1), (2) — уравнения плотности тока электронов и дырок; (3) — уравнение плотности поверхностного тока; (4) — уравнение Пуассона для распределения электростатического потенциала (4); (5) — уравнение темпа рекомбинации Шокли-Рида-Холла; (6) — уравнение концентрации равновесных носителей; (7) — уравнение

темпа оже-рекомбинации; (8) — уравнение скорости поверхностной рекомбинации; (9) — уравнение непрерывности; (10),(11) — уравнения энергетического баланса для электронов, дырок и кристаллической решетки [4], где j_n, j_p — плотность электронного и дырного токов, μ_n, μ_p — подвижность электронов и дырок, n, p — концентрация электронов и дырок, k — постоянная Больцмана, E_V, E_c — уровень валентной зоны и зоны проводимости, T_n, T_p — температура носителей заряда, m_n, m_p — массы электронов и дырок, $j_{n,surf}$ — плотность поверхностного тока и т.д.

Так как геометрические размеры 3D структуры исследуемых транзисторов достигали 7 мкм, использовалась модель структурного проектирования Sentaurus Structure Editor (SDE). Этот модуль используется для графического проектирования 2D и 3D структур. Формирование структуры при этом включает в себя генерацию геометрической модели по областям структуры вместе с контактами, задание аппроксимирующих профилей легирования и определение процесса построения вычислительной конечно-элементарной сетки. При построении области структуры и границы раздела считались бездефектными. Ширина области пространственного заряда p – n -переходов зависит от заданной сетки и выбранных концентраций полупроводников.

При расчете характеристик использовались следующие начальные условия: напряжение на контактах равно нулю, температура электродов и структуры в целом равна 300 К, контакты являлись омическими.

Для расчета приборно-технологической модели и при расчете электрофизических характеристик использовалась аддитивная сетка, измельчающаяся на границах раздела и в легированных областях материала. Размеры сетки изменялись от 0.1 до 0.001 мкм в кремнии. В подзатворном окисле сетка задавалась значительно меньше, согласно его толщине (0.0065 мкм).

4. Результаты и обсуждения

В таблице приведены следующие характеристики классического и оригинального транзистора с совмещенным с истоком контактом к карману: C — паразитная емкость „затвор-карман“, S — крутизна, t — время задержки переключения, U_{br} — пробивное напряжение подзатворного диэлектрика транзистора.

Таким образом, из таблицы видно, что транзисторы с двухслойным поликремниевым затвором обладают лучшими характеристиками, чем классические.

Характеристики классического и оригинального транзисторов

Тип транзистора	C , пФ	S	t , нс	U_{br} , В
Классический	8.56	$1.45 \cdot 10^{-5}$	0.213	12
Неклассический	0.28	$2.6 \cdot 10^{-5}$	0.18	15

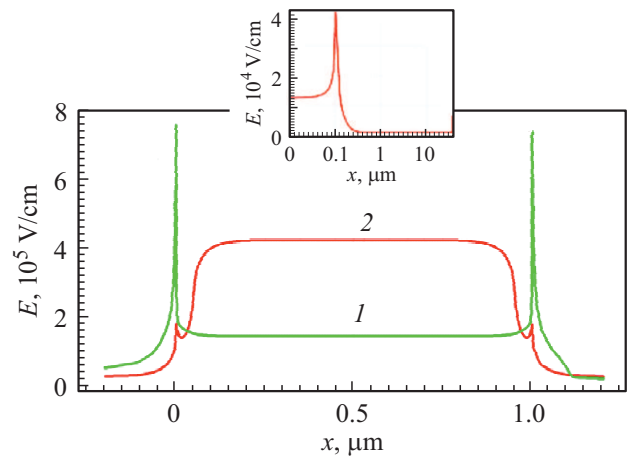


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике вблизи кремниевого островка для транзистора с однослойным поликремниевым затвором (1) и транзистора с двухслойным поликремниевым затвором (2). На вставке приведено распределение модуля напряженности электрического поля в слаболегированном ($N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$) кремниевом полупроводниковом образце прямоугольной формы длиной x .

Для визуализации отличия распределения напряженности поля в транзисторах рассмотрим распределение напряженности поля в подзатворном диэлектрике, на расстоянии $4 \cdot 10^{-4}$ мкм от поверхности кремниевого островка при напряжении на поликремниевой шине 1 В, а на кармане транзистора 0 (см. рис. 3). Кремниевый островок моделировался шириной 1 мкм и располагался при $0 < x < 1$.

Также при разработке технологии изготовления транзистора с зависимым контактом к карману необходимо учитывать зависимость напряженности электрического поля от расстояния до контакта. Особенно заметно это явление в низколегированных образцах, так как с уменьшением концентрации примеси полупроводника увеличивается его сопротивление [5].

Для анализа влияния расстояния между контактами к карману на управляемость области канала посредством приложения напряжения на контакт к карману было проведено моделирование 2D кремниевой полупроводниковой структуры, легированной аналогично карману (см. вставку на рис. 3).

Напряжение пробоя подзатворного диэлектрика классической структуры транзистора в 4 раза ниже напряжения пробоя подзатворного диэлектрика транзисторной структуры с двухслойным поликремниевым затвором. Таким образом, очевидно, что оригинальный транзистор является более надежным, чем классический транзистор.

Как указывалось ранее, в элементах ввода-вывода ИС используются „широкие“ транзисторы. Для проектирования „широких“ транзисторов необходимо учитывать эффект уменьшения напряженности электрического поля при удалении от контакта к карману [5]. Отрица-

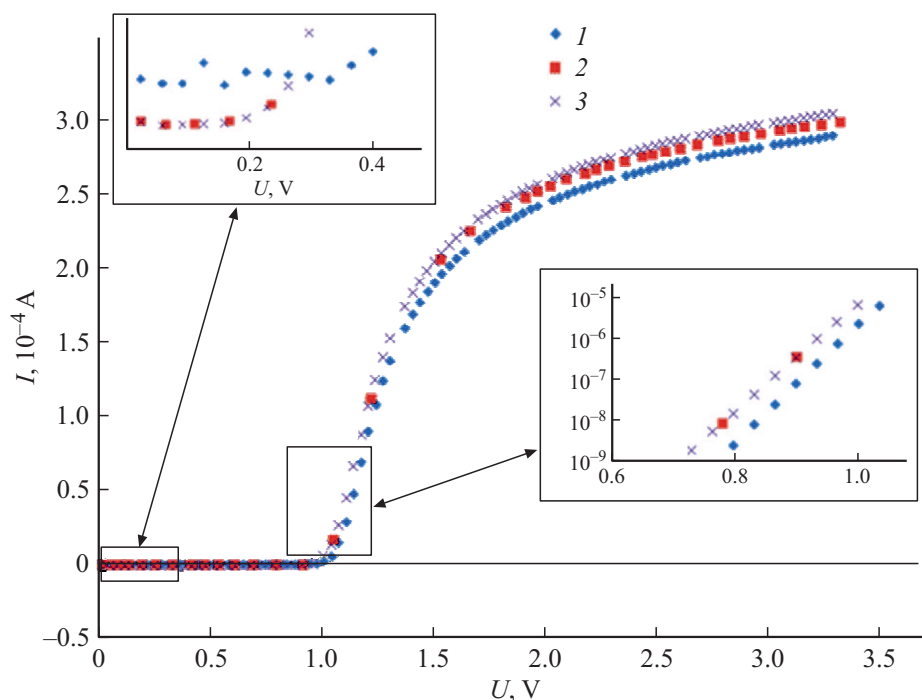


Рис. 4. Передаточные характеристики транзисторов оригинального и транзистора Honeywell: 1 — оригинального транзистора с напряжением на подложке -0.5 В; 2 — транзистора Honeywell с напряжением на подложке -0.5 В; 3 — транзистора Honeywell с напряжением на подложке 0 В.

тельным результатом данного эффекта является нарушение работы транзистора, а именно указанное может привести к задержке открытия канала. На вставке рис. 3 приведен результат моделирования в TCAD — распределение модуля напряженности электрического поля 2D структуры, где между двумя контактами (см. вставку на рис. 3) подавалось напряжение $V = 0$ В ($x = 35$ мкм) и напряжение $V = 3.3$ В ($x = 0.1$ мкм) соответственно. Исследуемая структура представляла собой кремниевый слой, толщиной 0.2 мкм, что соответствует толщине рабочего слоя структуры КНИ, и шириной 35 мкм, легированный фосфором концентрацией 10^{17} см $^{-3}$. Приведенное значение концентрации соответствует концентрации примеси в кармане транзистора. Контакты моделировались точечными на ширине 0.1 и 35 мкм.

Таким образом, при создании геометрии транзистора для улучшения управляемости областью канала, осуществляемой посредством подачи напряжения на контакт к карману, необходимо учитывать распределение напряженности электрического поля в легированном полупроводнике.

Учитывая выше перечисленные особенности, был разработан способ изготовления транзистора с зависимым контактом к карману и двухслойным поликремниевым затвором на структурах КНИ (оригинальный транзистор) шириной от 10 до 100 квадратов. Самосовмещенная технология такого транзистора отличается от той, что предложена в патенте Honeywell [1], введением дополнительного топологического слоя, который на гото-

вой структуре состоит из высоколегированной области кремния „вставки“ (контакта к карману, см. рис. 2) и слаболегированной области кремния, посредством которой происходит соединение „вставки“ с карманом транзистора. Так как предложенный контакт к карману не привязан к „охранному кольцу“ транзистора, на области истока можно сформировать несколько подобных контактов к карману („вставок“), тем самым учесть и исключить нежелательное падение напряженности электрического поля в кармане и улучшить управляемость областью канала посредством подачи напряжения на контакт к карману.

Предложенное изменение контакта к транзистору не приводит к существенному изменению электрофизических параметров, но способствует расширению области использования транзистора.

Моделирование передаточной характеристики осуществлялось при двух режимах. Первый режим моделирования: на исток и контакт к карману напряжение не подавалось (0 В), на сток подавалось напряжение 0.1 В. Рассчитывался ток стока в диапазоне напряжений на затворе от 0 до 3.3 В. Полученные передаточные характеристики транзисторов были абсолютно идентичны друг другу.

Второй режим моделирования включал следующие параметры: на исток напряжение не подавалось (0 В), на стоковый контакт подавалось напряжение 0.1 В, на контакт к карману подавалось напряжение -0.5 В. Рассчитывался ток стока в диапазоне напряжений на затворе

от 0 до 3.3 В. Полученные передаточные характеристики двух типов транзисторов различны. Начальный ток в оригинальном транзисторе превышает начальный ток в транзисторе Honeywell (см. рис. 4).

Более того, приложение напряжения на карман широкого транзистора Honeywell не привело к какому-либо изменению передаточной характеристики данного транзистора, что свидетельствует о том, что предложенный вариант формирования контакта к карману не подходит для широких транзисторов.

Приложение отрицательного напряжения на карман широкого оригинального транзистора привело не только к увеличению начального тока стока, но и к увеличению порогового напряжения транзистора (сдвигу характеристики вправо). Величины сдвига и увеличения начального тока зависят от значения приложенного напряжения. На рис. 4 при приложении небольшого напряжения, относительно напряжения питания, на контакт к карману оригинальной транзисторной структуры наблюдается динамика ВАХ. Для структуры Honeywell этого не наблюдается.

Полученные результаты свидетельствуют о лучшем управлении областью канала „широкого“ транзистора посредством контакта к карману в оригинальной структуре, чем в структуре Honeywell.

Таким образом, оригинальный транзистор не только обладает всеми преимуществами транзистора с двухслойным поликремниевым затвором, но и может использоваться в элементах ввода и вывода ИС.

5. Заключение

В ходе данной работы был рассмотрен транзистор на КНИ с двухслойным поликремниевым затвором. С помощью математического моделирования в САПР TCAD показано преимущество транзистора с двухслойным поликремниевым затвором над аналогичным транзистором с однослойным поликремниевым затвором. Такие транзисторы вследствие уменьшения напряженности электрического поля в верхних углах кремниевого островка и подзатворном диэлектрике являются более надежными. Вследствие использования охранной области транзистора — являются более стойкими к воздействию особенных факторов. Технология использования двухслойного поликремниевого затвора способствует уменьшению паразитной емкости „затвор—карман“ и, как следствие, увеличению быстродействия транзистора.

В статье также предложен способ изготовления „широкого“ транзистора КНИ с совмещенным с истоком контактом к подложке с двухслойным поликремниевым затвором. Данный транзистор не только обладает вышеперечисленными преимуществами над классическим транзистором, но и, вследствие модифицирования контакта к карману, позволяющему формировать более двух контактов к карману на области истока, имеет более широкую область использования. Предложенный

способ формирования контактов к карману позволяет варьировать ширину транзистора от 10 квадратов до 100 включительно без ухудшения управляемости областью канала транзистора.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Патент US 6960810 B2, P. Fechner, Honeywell International Inc., Self-aligned body tie for a partially depleted SOI device structure, 2005.
- [2] Патент US 6154091 A, H01L, J.P. Pennings, G.E. Smith, M.H. Wood, SOI sense amplifier with body contact structure, 1999.
- [3] К.О. Петросянци, Д.А. Попов, Д.В. Быков. Электроника, **22**, 569 (2017).
- [4] Т.А. Шоболова, Ю.А. Кабальнов, С.В. Оболенский. Электрон. техн., сер. 2, Полупроводники, **3** (258), 34 (2020).
- [5] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1.

Редактор А.Н. Смирнов

Silicon metal-oxide-semiconductor transistor with dependent pocket contact and two-layer polysilicon gate

T.A. Shobolova¹, A.S. Mokeev¹, S.D. Rudakov¹, S.V. Obolensky^{1,2}, E.L. Shobolov¹

¹ Branch of RFNC-VNIIEF

„NIIS named after Yu.E. Sedakov“, 603137 Nizhny Novgorod, Russia

² Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603022 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The author compares the characteristics of two constructive-technological versions of MOS SOI transistor with a wafer contact multiplexed with a source and with one and two layers of polysilicon gate. Following the results of the digital simulation, it is demonstrated that the transistors with two-layer polysilicon gate have an improved reliability, a better processing speed and resistance to the ionizing radiation. In the article, it is proposed to use a self-aligned technology of manufacturing transistors with dependent pocket contact and two-layer polysilicon gate that permits to implement transistors with a big proportions of width of the gate to the length (up to 100 times and more). The described constructive-technological features of transistor manufacturing provide an opportunity of an additional transistor channel control, improve its characteristics and expand its application area.