

УДК 621.382

РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ КНИ КМОП ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СБИС СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Чистяков М.Г., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»*

*Научный руководитель: Макаrchук В.В., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
shakhnov@iu4.bmstu.ru*

Введение

Топологической конструкцией транзистора предназначена для разработки сложной современной отечественной электронной компонентной базы [1], предназначенной для использования в электронных системах нового поколения, к которым предъявляются требования стойкости к специальным воздействиям. Для разработки топологической конструкции транзистора необходимо рассмотреть эффекты, которым подвержены микросхемы. Микросхемы, работающие в условиях космоса, подвержены радиационному воздействию. Существуют два основных класса воздействия радиационного облучения на микросхемы [2]:

-накопленная доза ионизации – (Total Ionizing Dose)

-эффекты однократного действия – (Single Event Effects, ЭОД)

Далее подробнее рассмотрим оба эффекта.

Стоит отметить, что тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ) в равной мере воздействуют на весь кристалл, поэтому рассмотренные эффекты справедливы для всех транзисторов, расположенных на кристалле.

1.1 Эффект накопленной дозы

При ионизирующем воздействии на кристалл основной заряд накапливается на границе изолирующего слоя (оксида кремния) и кремния. Этот факт связан с наличием около границы большого количества дефектов кристаллической решётки. Эти дефекты

кристаллической решётки объясняются технологией изготовления, так как для формирования изолирующего слоя необходимо осадить большое количество оксида (порядка 0,25 мкм). Для снижения времени выполнения операции используют высокую скорость осаждения изолирующего оксида кремния, что ведёт к образованию дефектов кристаллической решётки. Подзатворный оксид кремния имеет меньшие размеры и большую чистоту, поэтому в нем количество дефектов кристаллической решётки меньше, следовательно, в подзатворном оксиде заряд накапливается в меньшей степени, чем в нижних и боковых изолирующих оксидах.

Для транзисторов, изготовленных по технологии на монокристаллическом кремнии, накопление заряда на границе кремний - оксид кремния приводит к возникновению тиристорного эффекта. Тиристорный эффект – это открытие тиристора (сток *n*-канального транзистора/*p*-карман/*n*-карман/исток *p*-канального транзистора). Открытие такого тиристора ведёт к протеканию большого тока, что в некоторых случаях ведёт к пробое подзатворных диэлектриков и неработоспособности транзистора, а как следствие и всей схемы. Однако закрытие появившегося тиристора возможно только при отсутствии протекающего через него тока, что осуществимо лишь при отключении микросхемы от питания. Но это практически труднореализуемо для микросхем, работающих в системах специального назначения, где в основном и используются радиационно-стойкие микросхемы.

Для минимизации тиристорного эффекта существуют конструкции транзисторов, изготовленные по технологии на объёмном кремнии, с защитными кольцами [3]. Такая конструкция транзистора приведена на рис. 1. Но она занимает на кристалле довольно большую площадь, что неизбежно ведёт к уменьшению плотности компоновки и, как следствие, к снижению функциональности микросхемы.

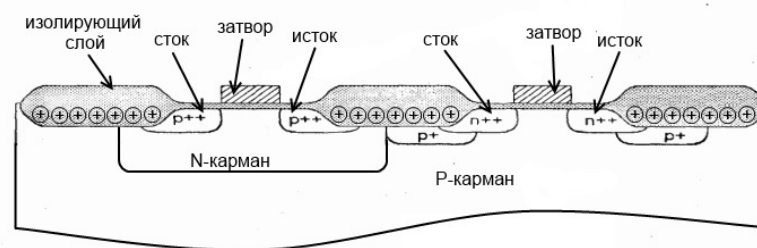


Рис. 1. Вертикальный профиль инвертора на КМОП-транзисторах с защитными кольцами, изготовленного по технологии объёмного кремния

В отличие от транзисторов, изготовленных по технологии на монокристаллическом кремнии, в транзисторах, изготовленных по технологии кремний на изоляторе (КНИ), не возникает тиристорный эффект, так как при данной технологии транзисторы полностью электрически изолированы (рис. 2). Также конструкция такого транзистора занимает на кристалле меньшую площадь, чем конструкция транзистора с изолирующими кольцами.

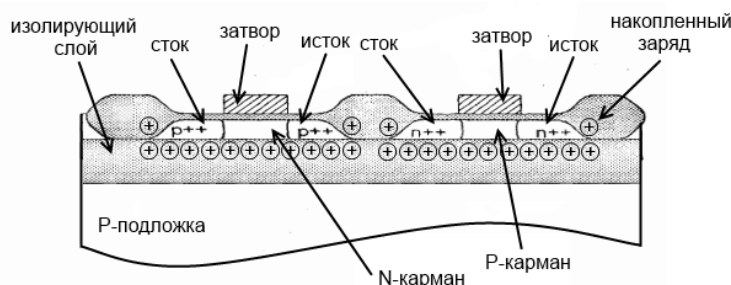


Рис. 2. Вертикальный профиль инвертора на КМОП-транзисторах, изготовленного по технологии «кремний на изоляторе»

Однако транзистор, изготовленный по технологии КНИ, имеет паразитные каналы, возникающие в боковой и нижней частях тела из-за накопления заряда при радиационном облучении на границе кремний - изолирующий оксид. Это и есть основной механизм образования накопленной дозы. На рис. 3 представлены паразитные каналы в КНИ транзисторе при этом механизме.

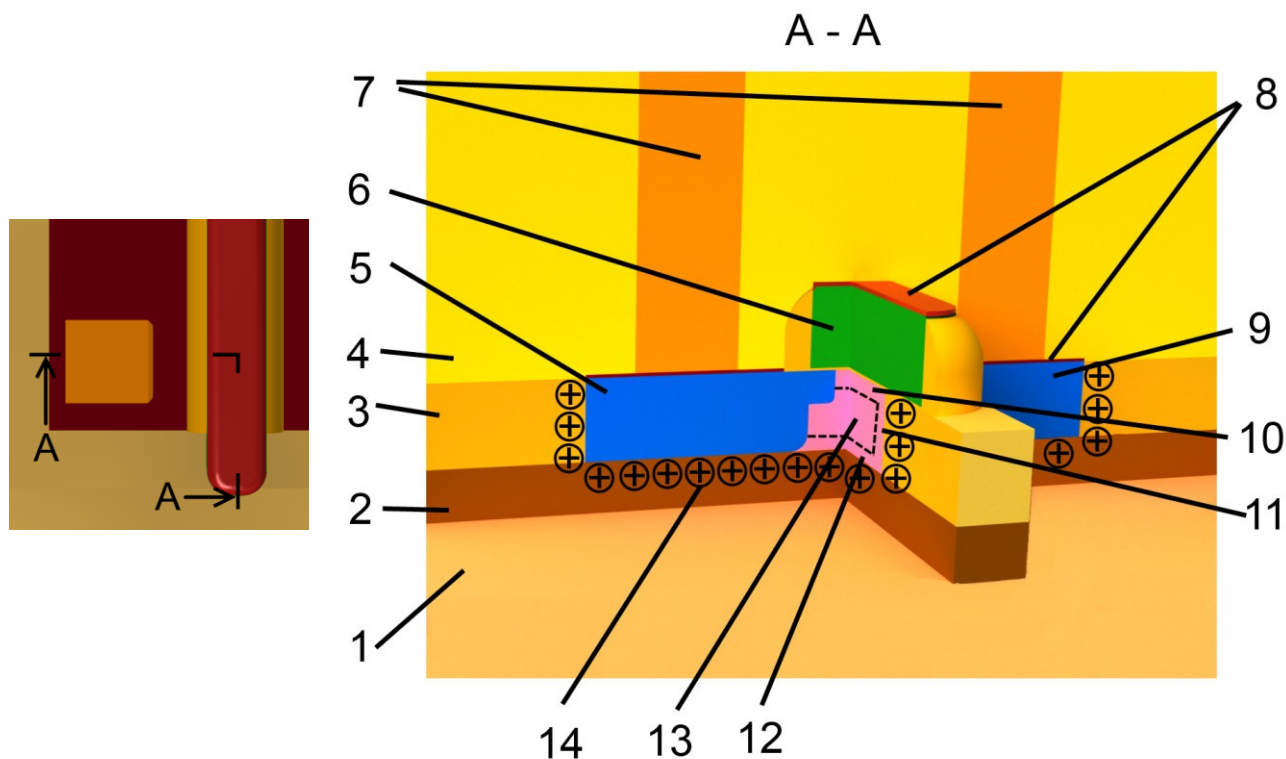


Рис. 3. Разрез *n*-канального КМОП КНИ транзистора
с паразитными каналами

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1 – подложка; | 8 – слой силицида; |
| 2 – нижний изолирующий слой; | 9 – область стока; |
| 3 – боковой изолирующий слой; | 10 – область основного канала транзистора; |
| 4 – верхний изолирующий слой; | 11 – область бокового паразитного канала; |
| 5 – область истока; | 12 – область нижнего паразитного канала; |
| 6 – затвор; | 13 – область тела транзистора; |
| 7 – контакт к металлу; | 14 – заряд, накопленный изолирующем слое. |

При накоплении заряда в нижнем изолирующем слое открывается нижний паразитный канал. Открытие нижнего канала ведёт к увеличению токов утечки. Данная проблема решается путём подбора уровня легирования. Этот метод подробно описан в работе [4].

При накоплении заряда в боковом изолирующем слое открывается боковой паразитный канал, который также приводит к увеличению токов утечки. Данную проблему возможно решить при проектировании топологии, используя специальные конструкции транзисторов.

Далее в работе будут подробно рассмотрены такие конструкции транзисторов.

1.2 Эффекты однократного действия (ЭОД)

Эффект однократного действия (ЭОД) – это эффект, возникающий из-за пролёта тяжёлой заряженной частицы через различные области транзистора: истока, стока или тела транзистора. Так как транзисторные области располагаются в слое кремния, ТЗЧ при прохождении через слой кремния взаимодействует с ним и порождает на своём пути электронно-дырочные пары, которые в дальнейшем рекомбинируют. Количество порождённых электронно-дырочных пар пропорционально энергии частицы. Так как при взаимодействии частица замедляется, количество электронно-дырочных пар при пролёте частицы уменьшается. Затем сгенерированные электронно-дырочные пары рекомбинируют. Сначала рекомбинируют электроны в связи с наличием у них большей подвижности, чем у дырок. В результате рекомбинации электронов остаются дырки, которые обладают положительным зарядом, что приводит к образованию дополнительного положительного заряда. Общее время рекомбинации электронно-дырочных пар составляет несколько сотен пикосекунд [2].

Так как наводится дополнительный заряд в рабочем теле транзистора, то происходит образование импульсной помехи. Как показано на рис. 4-5, рабочий объем транзисторов, изготовленных по технологии КНИ, в несколько раз меньше рабочего объёма транзистора, изготовленного по технологии объёмного кремния.



Рис. 4. Образование электронно-дырочных пар в полевом транзисторе, изготовленном по технологии объёмного кремния

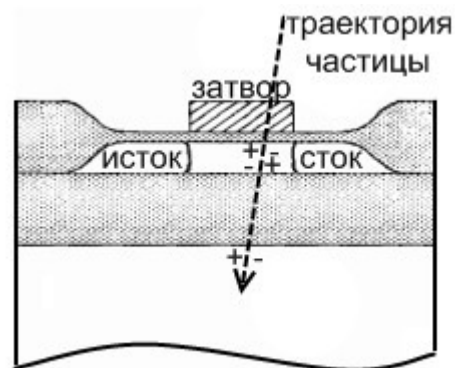


Рис. 5. Образование электронно-дырочных пар в полевом транзисторе, изготовленном по технологии «кремний на изоляторе»

Из этого следует, что количество электронно-дырочных пар, участвующих в образовании дополнительного заряда, для транзистора, изготовленного по КНИ технологии, меньше. Следовательно, меньший дополнительный заряд образуется в рабочей области транзистора, что ведёт к образованию меньшей по величине импульсной помехи, чем для транзистора, изготовленного по технологии на объёмном кремнии.

Исходя из анализа приведённых эффектов для обеспечения радиационной стойкости целесообразно использовать технологию изготовления КНИ транзисторов. Однако у данной технологии есть важная особенность, возникающая из-за полной электрической изоляции транзисторов – это эффект «плавающего» тела. Далее подробно рассмотрим этот эффект.

1.3 Эффект «плавающего» тела

Эффект «плавающего» тела (иначе называемый «кинк»-эффектом, kink-effect) заключается в увеличении тока стока при нахождении транзистора в области насыщения [5]. Он является основным паразитным эффектом в частично-обеднённом КНИ МОП-транзисторе. Механизм образования эффекта «плавающего» тела для *n*-канального КНИ МОП-транзистора показан на рис. 6.

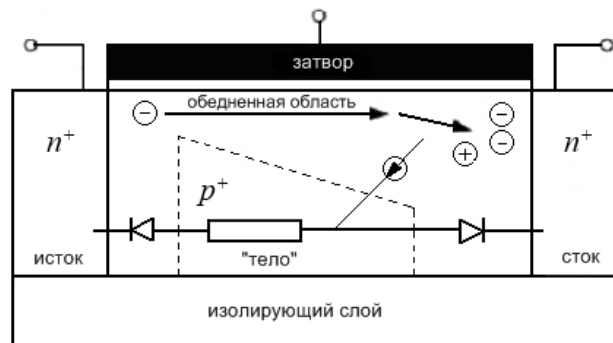


Рис. 6. Механизм образования эффекта «плавающего» тела

Причиной его возникновения является ударная ионизация, которая возникает при пролёте электронов с высокой энергией, вследствие высокой напряжённости электрического поля в канале транзистора. В этом случае электроны из области истока при движении через канал приобретают высокую энергию, создавая на своём пути большое количество электронно-дырочных пар. Поскольку электроны обладают большей подвижностью, они под действием электрического поля канала перемещаются в область стока. Дырки, обладающие

низкой подвижностью, не могут переместиться в область истока, и поэтому под действием электрического поля аккумулируются в нижней части тела транзистора, недалеко от истока.

Так как дырки обладают положительным зарядом, то накопление дырок приводит к увеличению потенциала тела транзистора. Увеличение потенциала на теле транзистора ведёт к открытию биполярного транзистора с «плавающей» базой: исток-«плавающее» тело-сток. Открытие такого транзистора ведёт к увеличению тока, протекающего через транзистор, так как помимо основного канала транзистора параллельно с ним открывается биполярный транзистор с «плавающей» базой.[6]

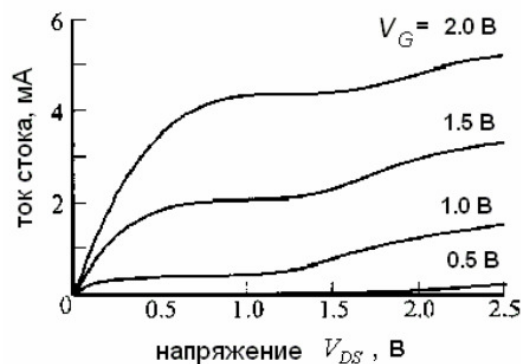


Рис. 7. Семейство выходных характеристик n-канального КНИ МОП-транзистора

Как показано на рис. 7, при увеличении напряжения между стоком и истоком (V_{DS}), ток на стоке нелинейно возрастает. Это и есть эффект «плавающего» тела.

При низком напряжении на затворе напряжённость электрического поля в канале меньше и, как следствие, меньше скорость ударной ионизации и количество сгенерированных электронно-дырочных пар. Поэтому, как показано на рис. 7, этот эффект проявляется в меньшей степени.

Для минимизации влияния эффекта «плавающего» тела необходимо стабилизировать потенциал тела транзистора. Для этого необходимо сформировать контакт к телу транзистора. В связи с полной изоляцией транзисторов, изготовленных на КНИ структурах, и с отсутствием возможности формирования контакта со стороны подложки, контакт необходимо осуществлять со стороны затвора. Рассмотрим подробнее топологические конструкции транзисторов, обеспечивающие контакт к телу транзистора.

2.1 Анализ конструкций транзисторов, применяемых в СБИС специального назначения

Существуют три основных типа конструкций транзисторов, применяемых в СБИС специального назначения. Это транзисторы А-, О- и Н- типов. Их топологии представлены на рис. 8, 9, 10, соответственно.

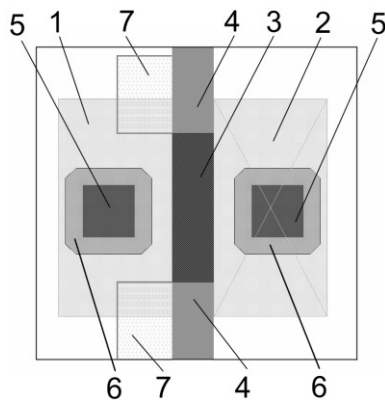


Рис. 8. Транзистор А-типа

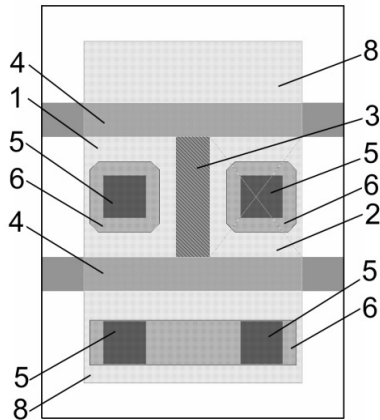


Рис. 9. Транзистор Н-типа

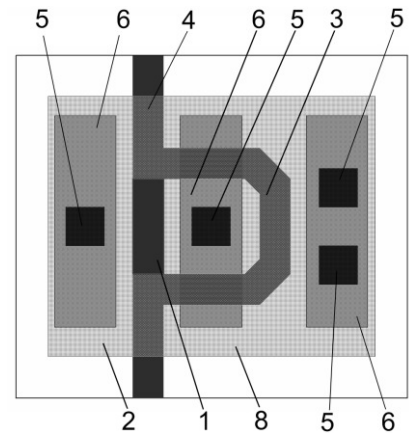


Рис. 10. Транзистор О-типа

1. - Область истока

2. - Область стока

3. - Активная часть затвора

4. - Пассивная часть затвора

5. - Контакт к слою металлизации

6. - Слои металлизации

7. - Вставки

8. - Область тела транзистора

Как видно из рис. 8, у транзистора А-типа заземление тела осуществляется при помощи «вставок». «Вставки» – это области, расположенные на границе областей затвора и истока, легированные таким же типом примеси, что и область тела, и соединённые слоем силицида с областью истока. У транзисторов Н- и О-типов подключение к телу транзистора, обеспечивают области, легированные примесью такого же типа проводимости, что и область тела, и отделённая от стока и стока слоем поликремния.

Сравнения и оценка преимуществ и недостатков каждого типа транзистора приведены табл. 1.

Таблица 1

Преимущества и недостатки транзисторов А-, О- и Н-типов

Критерий	Транзистор А-типа	Транзистор О-типа	Транзистор Н-типа
Компактность	+	–	±
Контакт к телу	±	+	+
Возможность разводки по слою силицида	+	–	+
Малая рассеиваемая мощность	+	–	±
Малое изменение электрических параметров при наборе дозы	–	+	±

Как видно из таблицы, с точки зрения компактности размещения транзисторов на кристалле, их можно расположить по убывающей: сначала транзистор А-типа, потом Н-типа, затем О-типа. Это связано с различной формой затворов и наличием пассивной части затвора. Пассивная часть затвора – это та часть затвора, которая не используется в формировании канала транзистора и служит для разделения областей *p*- и *n*-типов (для формирования контакта к телу транзистора) [7]. У транзистора А-типа полностью отсутствует пассивная часть, а контакт к телу осуществляется за счёт «вставок», поэтому при одинаковой ширине канала у транзистора А-типа площадь, занимаемая на кристалле, наименьшая. Далее располагается транзистор Н-типа, что связано с наличием пассивной части. Транзистор О-типа, с точки зрения занимаемой площади, находится на последнем месте, т.к. внутри кольца необходимо установить контакт, что неизбежно приводит к увеличению размеров и, следовательно, к увеличению занимаемой им площади кристалла. У всех типов рассмотренных транзисторов существует контакт к телу, но в транзисторе А-типа он жёстко связан с потенциалом истока, что делает невозможным использование транзистора в проходных ключах. У транзисторов Н- и О- типов такой контакт электрически не связан с областью истока.

С точки зрения топологической реализации библиотечного элемента важным является возможность разводки с помощью слоя силицида, который покрывает активную зону транзистора. Это позволяет сократить количество слоёв металла и использовать только один

слой металлизации при построении библиотечного элемента. У транзисторов А- и Н-типов такая возможность есть, в отличие от транзистора О-типа.

Теперь рассмотрим транзисторы указанных типов с точки зрения их электрических параметров. Одним из важных параметров является входная ёмкость. Основной вклад во входную ёмкость транзистора даёт ёмкость подзатворного диэлектрика [8], которая прямо пропорциональна длине и ширине канала, при этом учитывается и активная, и пассивная его части. Поэтому при одинаковой ширине канала у транзистора А-типа наблюдается самая малая входная ёмкость, у транзистора О-типа наблюдается самая большая входная ёмкость. У транзистора Н-типа входная ёмкость имеет промежуточное значение.

Входные и выходные характеристики транзисторов А-, Н-, О-типов с длиной канала $L = 0,25$ мкм и шириной затвора $W = 3$ мкм изображены на рис. 11–12.

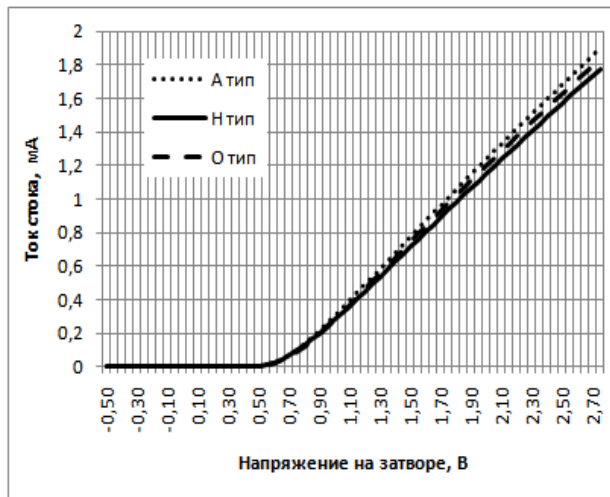


Рис. 11. Входные характеристики транзисторов А, Н, О типов.

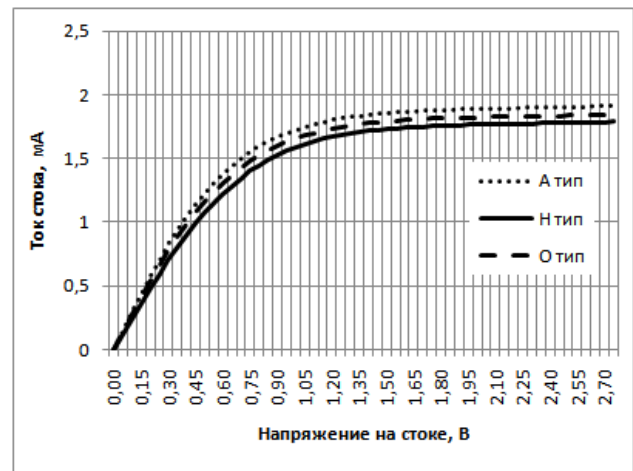


Рис. 12. Выходные характеристики транзисторов А-, Н-, О- типов при напряжении на затворе 2,75 В.

Входные характеристики у всех транзисторов без набора дозы близки по значениям (различия между значениями менее 5%), что видно из графика. Это позволяет использовать транзисторы в одной интегральной микросхеме без использования специальных схем сопряжения.

Как видно из выходных характеристик, различия между значениями величин токов менее 5%. При высоких значениях напряжения на затворе транзистор А-типа обладает большим током стока, в отличие от транзисторов О- и Н-типов. Это связано с допуском на

значения ширины канала (W) и длины канала (L). У транзистора А-типа канал формируется между вставками, и, как следствие, соответствие проектных значений ширины канала (W) и длины канала (L) реальным является более точным. У транзистора Н-типа в местах соединения активной и пассивной частей затвора происходит увеличение длины канала (L), как показано на рис. 13, что ведёт к снижению протекающего в этих местах тока. У транзистора О-типа также идёт увеличение длины канала (L), как показано на рис. 14, в местах соединения активной и пассивной частей затвора 1, что также ведёт к снижению протекающего в этих местах тока.

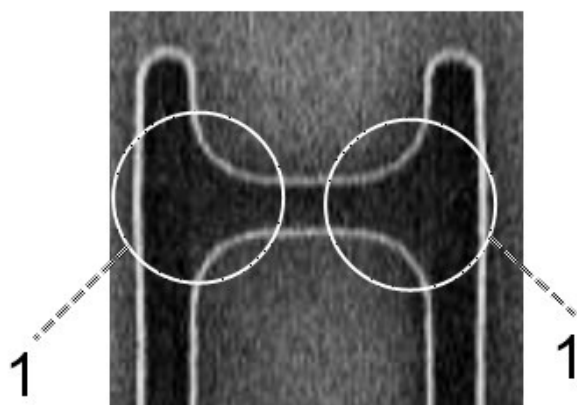


Рис. 13. Изготовленный транзистор Н-типа

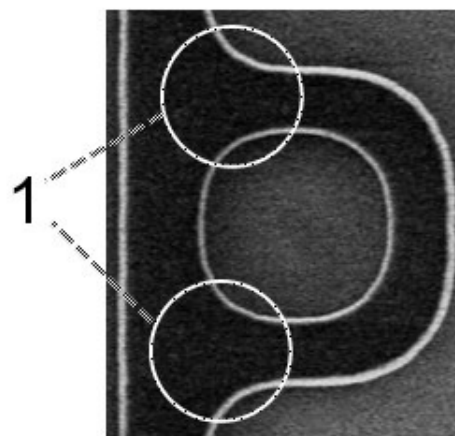


Рис. 14. Изготовленный транзистор О-типа

1 – Место стыковки активной и пассивной областей

Для создания центральной части кристалла было разработано новое конструктивное решение транзистора Н-типа (рис. 15), способное выдержать радиационное воздействие.

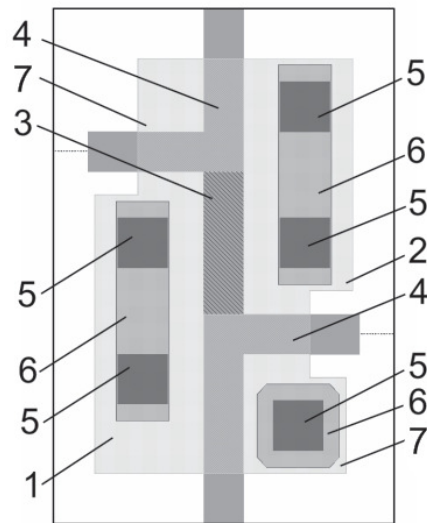


Рис. 15. Модифицированный транзистор Н-типа

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1. - Область истока; | 5. - Контакт к слою металлизации; |
| 2. - Область стока; | 6. - Слои металлизации; |
| 3. - Активная часть затвора; | 7. – Область телом транзистора. |
| 4. - Пассивная часть затвора; | |

По сравнению со стандартным транзистором Н-типа модифицированный транзистор имеет меньшую входную ёмкость и занимает меньшую площадь.

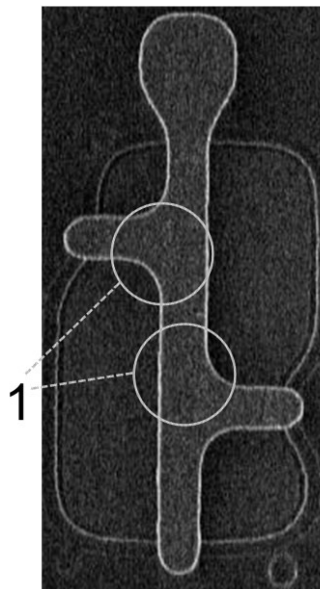


Рис. 16. Изготовленный модифицированный транзистор Н-типа

- 1 – Место стыковки активной и пассивной областей

Дополнительное преимущество модифицированной конструкции транзистора Н-типа заключается в том, что по сравнению с другими типами транзисторов у него ширина затвора сохраняется неизменной на большей части его длины (рис. 16), в результате чего он имеет большее значение тока насыщения.

Заключение

На основе сравнительного анализа топологических решений для транзисторов, формируемых по технологии КНИ, разработана конструкция модифицированного транзистора Н-типа, обеспечивающая стойкость к специальным воздействующим факторам. На основе этой топологической конструкции разработана библиотека топологий стандартных элементов цифровых СБИС, содержащая свыше 200 элементов центральной части кристалла, которые будут использованы при проектировании отечественных СБИС нового поколения.

Список литературы

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств / Под общ. редакцией В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 500 с.
2. Радиационные эффекты при воздействии тяжелых заряженных частиц на КНИ СБИС и способы их моделирования /С.А. Морозов, С.А. Соколов // Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты: Труды НИИСИ РАН. - М., 2011. – том 1, №2 – С.47-51.
3. Методы повышения радиационной стойкости интегральных микросхем НПО «ИНТЕГРАЛ», предназначенных для условий работы в космических летательных аппаратах. URL: <http://www.155la3.ru/datafiles/1817vf11.pdf> (Дата обращения: 23.10.2013г.).
4. Исследование и моделирование факторов, ограничивающих радиационную стойкость КНИ СБИС /С.И. Волков, А.А. Глушко, С.А. Морозов // Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты: Труды НИИСИ РАН. - М., 2011. – том 1, №1 – С.51-56.
5. Kerry Bernstein, Norman J. Rohrer SOI Circuit design concepts – London: Kluwer academic publishers, 2003. – 220p.
6. Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 288 с.

7. James B. Kuo, Ker-Wei Su CMOS VLSI Engineering Silicon-on-Insulator (SOI) – London: Kluwer academic publishers, 1998. – 422p.
8. Мурогa С. Системное проектирование сверхбольших интегральных схем том 1 – М.:Мир, 1985. – 288с.