

Алферова Ирина Александровна – Донской государственный технический университет; e-mail: ia.alferova.donstu@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра кибербезопасности информационных систем; ст. преподаватель.

Сафарьян Ольга Александровна – e-mail: safari_2006@mail.ru; кафедра кибербезопасности информационных систем; к.т.н.; доцент.

Габриэлян Дмитрий Давидович – Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи; e-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра радиоэлектроники; д.т.н.; профессор.

Кульбикаян Баграт Хачересович – Ростовский государственный университет путей сообщения; e-mail: bagrat@rgups.ru; Ростов-на-Дону, Россия; кафедра связи на железнодорожном транспорте; к.ф.-м.н.; доцент.

Стажарова Любовь Николаевна – e-mail: sln.67@mail.ru; кафедра автоматике и телемеханики на железнодорожном транспорте; к.ф.-м.н.; доцент.

Alferova Irina Alexandrovna – Don State Technical University; e-mail: ia.alferova.donstu@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of cybersecurity of information systems; senior lecturer.

Safaryan Olga Alexandrovna – e-mail: safari_2006@mail.ru; the department of cybersecurity of information systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Gabrielyan Dmitry Davidovich – Rostov Scientific Institute of Radio Communication; e-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of radio electronics; dr. of eng. sc.; professor.

Kulbikayan Bagrat Hacheresoviche – Rostov State Transport University; e-mail: bagrat@rgups.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of communication on railway transport; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Stazharova Lyubov Nikolaevna – e-mail: sln.67@mail.ru; the department of communication on railway transport; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

УДК 621.382.3

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-128-137

П.Г. Грицаенко**ИНЖЕКЦИОННО-ПОЛЕВАЯ СТРУКТУРА, ВЫПОЛНЕННАЯ ДВОЙНОЙ ДИФфуЗИЕЙ ПРИМЕСЕЙ**

В 80-е годы прошлого столетия в качестве элементной базы широко применялась интегральная инжекционная логика (И²Л). Несколько позднее в развитие И²Л для построения СБИС появилась инжекционно-полевая логика (ИПЛ). Оба элементных базиса близки по степени интеграции на кристалле. Увеличения степени интеграции в СБИС можно достигнуть с использованием самосовмещения областей, при котором введение примесей разного типа осуществляется с использованием одной границы маскирующего материала. В данной работе этот принцип используется для создания вертикального канала ключевого полевого транзистора ИПЛ-логики. В эпитаксиальной пленке р-типа, нанесенной на подложку n⁺-типа, последовательно создаются сначала область n-типа с глубиной большей толщины эпитаксиальной пленки, а затем в то же окно выполняется диффузия примеси с созданием области р-типа. Промежуток между этими областями n-типа является каналом формируемого полевого транзистора. Далее создается мелкая область n⁺-типа, перекрывающая канал, которая является областью стока ключевого полевого транзистора с вертикальным каналом, диффузионная область р-типа является затвором, а однородно легированная область эпитаксиальной пленки выполняет функцию инжектора. Разветвление по выходу в данной

ИПЛ-структуре обеспечивается путем размещения нескольких стоков по периметру канала. Благодаря такой геометрии, структура обладает большей воспроизводимостью параметров по сравнению с основной конструкцией ИПЛ. Рассмотрены топологические варианты выполнения ИПЛ-ячейки и схем на ее основе: схемы 6 ИЛИ-НЕ и D_T -триггера. Предлагаемый конструктивно-технологический вариант ИПЛ-ячейки может быть рекомендован для создания СБИС высокой степени интеграции.

Инжекционно-полевая логика; профиль распределения примеси; самосовмещение областей; воспроизводимость; плотность компоновки.

P.G. Gritsaenko

INJECTION-FIELD STRUCTURE MADE BY DOUBLE DIFFUSION OF IMPURITIES

In the 80s of the last century, integrated injection logic (I^2L) was widely used as an element base. Somewhat later, in the development of I^2L , injection-field logic (IPL) appeared for the construction of VLSI. Both element bases are close in the degree of integration on a chip. An increase in the degree of integration into VLSI can be achieved using self-displacement of regions, in which the introduction of impurities of different types is carried out using a single boundary of the masking material. In this paper, this principle is used to create a vertical channel of a key field-effect transistor of IPL logic. In a p-type epitaxial film deposited on an n^+ -type substrate, an n-type region with a depth greater than the thickness of the epitaxial film is sequentially created first, and then impurity diffusion is performed in the same window with the creation of a region p-type. The gap between these n-type regions is the channel of the field-effect transistor being formed. Next, a shallow n^+ -type region is created that overlaps the channel, which is the drain region of a key field-effect transistor with a vertical channel, the p-type diffusion region is a gate, and the uniformly alloyed region of the epitaxial film performs the function of an injector. Branching along the outlet in this IPL structure is provided by placing several drains along the perimeter of the channel. Due to this geometry, the structure has a greater reproducibility of parameters compared to the basic design of the IPL. Topological variants of the implementation of the IPL cell and schemes based on it are considered: schemes 6 OR-NOT and D_T -trigger. The proposed design and technological version of the IPL cell can be recommended for creating VLSI of a high degree of integration.

Injection-field logic; impurity distribution profile; the very combination of areas; reproducibility; layout density.

Введение. Инжекционно-полевая логика (ИПЛ) [1–8] наряду с интегральной инжекционной логикой (I^2L) [9–13] имела широкое распространение для изготовления БИС и СБИС в 80-е годы прошлого столетия. Работы в данном направлении последнее время не проводились, тем не менее они могут представлять определенный интерес. В [6] автором предложена конструкция ИПЛ-структуры, выполненная с использованием технологии самосовмещения областей, сравнимая с КМОП-базисом по быстродействию, и превосходящая его по степени интеграции и выходу годных. В [13] показано, что инжекционные структуры могут иметь очень низкий, порядка нескольких пиковатт, уровень энергопотребления, что является преимуществом по сравнению с КМОП.

В типовой ИПЛ-структуре область стока «вписывается» в область затвора, что обуславливает значительные габариты структуры и наличие большой паразитной емкости из-за перекрытия данных областей.

Постановка задачи. Вариант оригинальной конструкции ИПЛ-структуры, позволяющей уменьшить перекрытие областей стока и затвора и, кроме того, обладающей повышенной воспроизводимостью параметров, плотностью компоновки и функциональной гибкостью, предложен автором, в [14]. Разрез данной структуры и ее топология приведены на рис. 1.

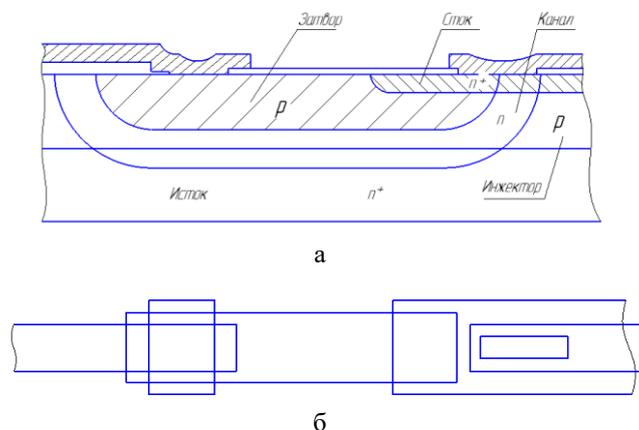


Рис. 1. Инжекционно-полевая структура, выполненная двойной диффузией примесей: а – разрез; б – топология

Формулировка задачи. В предлагаемой конструкции канал n -типа полевого транзистора заключен между двумя диффузионными областями, выполненными в одно окно. Боковая сторона p - n -перехода, образованного диффузионной n -областью и эпитаксиальной пленкой, представляет собой инжектор. Диффузионная область p -типа выполняет роль затвора, мелкая диффузионная область n^+ -типа служит стоком.

Уменьшение размеров данной структуры, в дальнейшем называемой двухдиффузионной, достигается, благодаря тому, что сток не должен вписываться в область затвора. Кроме того, в связи с исключением влияния разброса размеров «островка», формирующего канал в типовой ИПЛ-структуре, увеличивается воспроизводимость при изготовлении.

Техпроцесс изготовления. Последовательность операций при изготовлении двухдиффузионной ИПЛ-структуры является типовой [15–20] и представлена на рис. 2. При изготовлении используется свойство селективности травителей по отношению к нитриду и окислу кремния. После первой фотогравировки и вскрытия окон в Si_3N_4 формируются области n -типа. Закрываются фоторезистом области формирования промежутков между затворами, формируемыми в одном общем кармане n -типа, выполняется ионная имплантация бора. Выполняется снятие фоторезиста и разгонка бора с окислением. При фотолитографии для формирования областей стока применяется травитель, действующий только на Si_3N_4 . После ионной имплантации фосфора выполняется окисление. Выполняется фотолитография окон под контакты травителем, действующим только на SiO_2 , при этом окна на фотошаблоне выполнены большими, перекрывающими ранее изготовленные окна для проведения двойной диффузии.

При этом размер ИПЛ-структуры равен минимальной ширине линий при фотолитографии для данного уровня технологии.

Ввиду того, что размер канала в данной ИПЛ-структуре определяется медленными и хорошо управляемыми процессами диффузии и не зависит от точности выполнения размеров и совмещения слоев при фотолитографии, структура обладает большей воспроизводимостью параметров по сравнению с основной конструкцией ИПЛ.

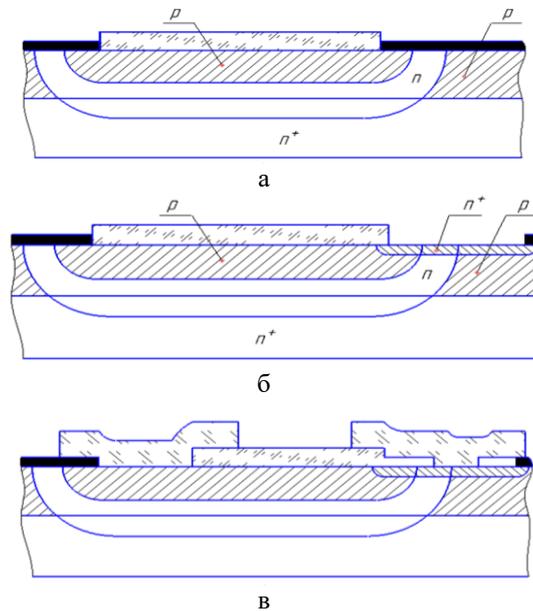


Рис. 2. Техпроцесс, изготовления двухдиффузионной ИПЛ-структуры:
 а – фотогравировка, травление нитрида, диффузия фосфора, диффузия бора, окисление; б – фотогравировка, травление нитрида, диффузия фосфора, окисление; в – фотогравировка, травление окисла, напыление металла, фотогравировка, формирование межсоединений

Применение в СБИС. Разветвление по выходу в данной ИПЛ-структуре обеспечивается путем размещения нескольких стоков по периметру затвора.

Особенностью полевого транзистора данной ИПЛ-структуры является то, что один из объемных зарядов, перекрывающих канал, прилегает к постоянно находящемуся под прямым смещением инжекторному переходу и имеет, вследствие этого, небольшую толщину. При нулевом напряжении на затворе (диффузионная область p -типа) канал перекрывается его объемным зарядом и частью объемного заряда p -области (инжектора), сосредоточенной в канале.

Для уменьшения паразитной емкости затвор-исток желательно, чтобы область затвора p -типа не перекрывалась с высоколегированной подложкой n^+ -типа.

При конструировании ИС на основе двухдиффузионной ИПЛ-структуры возможно совмещение границ рядом расположенных структур и совмещение нескольких стоковых областей в одну при условии, что совмещаемые структуры образуют схемы И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Пример реализации трехходовой схемы ИЛИ-НЕ представлен на рис. 3. Как видно, в данном случае функции затворов и одновременно входов логической схемы выполняют и диффузионная область p -типа и части эпитаксиальной пленки, отсеченные со всех сторон диффузионной областью n -типа. Технология изготовления такой микросхемы имеет некоторые особенности.

После первой фотогравировки закрытыми нитридом остаются области затвора 1 и затвора 3. Производится диффузия фосфора без окисления с образованием области n -типа. Выполняется следующая фотогравировка, в результате которой на поверхности остаются узкие полоски фоторезиста (показаны на рис. 3 двойной штриховкой). Их задачей является защитить неокисленную часть микросхемы от проводимой затем ионной имплантации и сформировать промежуток между затвором 2 и инжектором. Далее осуществляется разгонка бора в окислительной среде, причем

расстояние между фронтами диффузии областей p и n -типа должно быть несколько больше, чем в обычном варианте двухдиффузионной структуры (см. рис. 1), так как канал должен быть нормально перекрыт при нулевых напряжениях на обеих образующих его p -областях затворов (в структуре рис. 1, p - n -переход, образованный эпитаксиальной пленкой и n -областью, постоянно находится под прямым смещением, являясь инжектором, и его объемный заряд минимален).

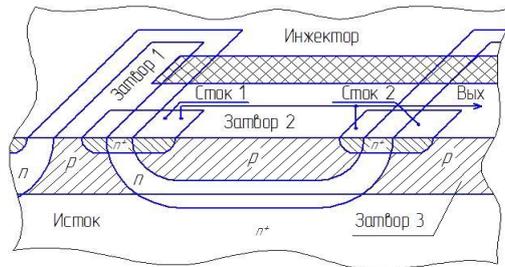


Рис. 3. Логическое устройство 3 ИЛИ-НЕ

При условии, что напряжение на всех трех затворах равно нулю, пространство под обоими стоками перекрыто объемным зарядом, и ток в выходной цепи не протекает. На выходе при этом сформирован высокий уровень потенциала.

При наличии прямого смещения хотя бы на одном из затворов объемный заряд, создаваемый его p - n -переходом, сужается и под ним образуется квазинейтральная область, проводящая основные носители. В выходной цепи появляется ток, и потенциал выходной шины снижается до нуля.

Применение данного метода функциональной интеграции областей на основе двухдиффузионной структуры позволяет реализовать схемы ИЛИ-НЕ практически с любым числом входов. Пример возможного варианта конструкции многовходовой схемы ИЛИ-НЕ приведен на рис. 4. Каждая многовходовая схема ИЛИ-НЕ представляется в виде ряда прямоугольников, количество которых равно числу входов данной схемы. Светлые прямоугольники соответствуют p -областям затворов, а перекрывающие их затемненные прямоугольники – n^+ -областям стоков. Области фоторезиста, показанными двойной штриховкой, ограничиваются размеры структур по вертикали. При компоновке следует учитывать, что однородно легированные p -области должны чередоваться с диффузионными p -областями.

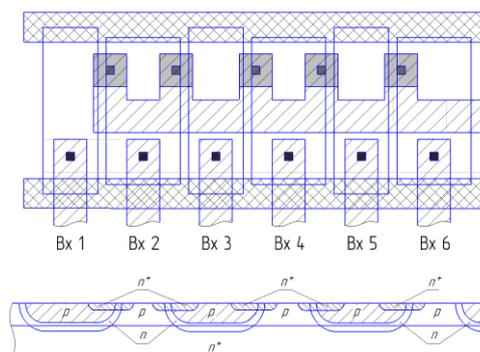


Рис. 4. Вариант конструкции многовходовой схемы ИЛИ-НЕ

Иллюстрацией конструирования более сложных схем с применением нового метода является разработка топологии D_T -триггера, функциональная схема которого приведена на рис. 5. На рис. 6 приведен упрощенный эскиз топологии триггера.

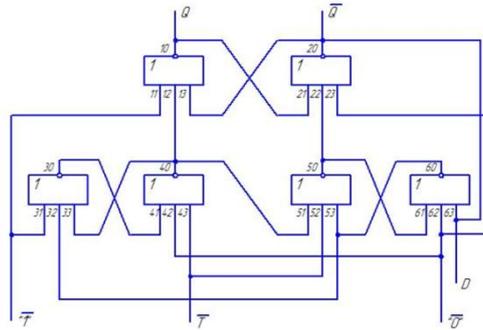


Рис. 5. Функциональная схема D -триггера

Методика конструирования. Основными этапами методики конструирования логических ИС на основе двухдиффузионной структуры являются следующие:

- ◆ представление заданной логической функции в базисе ИЛИ-НЕ;
- ◆ представление каждого элемента ИЛИ-НЕ функциональной схемы в виде ряда прямоугольников, число которых равно числу входов плюс единица, причем параллельно расположенные прямоугольники входов перекрываются прямоугольником, соответствующим n^+ -области выхода;
- ◆ определение числа областей: число p -областей равно суммарному числу входов всех логических элементов функциональной схемы минус число связей между ними, число n^+ -областей равно числу выходов элементов ИЛИ-НЕ;

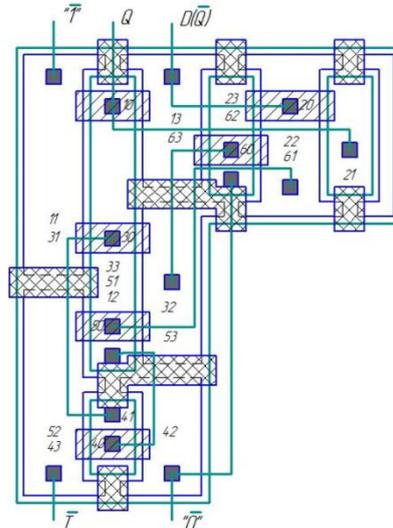


Рис. 6. Упрощенный эскиз топологии триггера D -триггера

- ◆ проведение компоновки; задачей компоновки является нахождение такого взаимного расположения p -областей (которые при объединении двух или трех областей в одну превращаются в полосы) и связанных с ними n^+ -областей, чтобы исключить пересечения соединяющих их шин металлизации и добиться минимальной длины этих шин;

- ◆ определение принадлежности каждой из p -областей либо к диффузионным областям, либо к однородно легированным областям; эти два типа областей чередуются друг с другом, причем размеры однородно легированных областей

определяются размерами областей толстого окисла, расположенного над ними, а размеры диффузионных p -областей – областями толстого окисла и перемычками из фоторезиста, перекрывающего их; в случае если число p -областей в ряду нечетное, то ряд начинается и заканчивается однородно легированной областью, если четное, то для ограничения замыкающей диффузионной области применяется полоска из фоторезиста, окружающая область с трех сторон.

Пример возможного распределения примесей в различных областях структуры для исходной концентрации примеси $N_{\text{эл}} = 7,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ приведен на рис. 7.

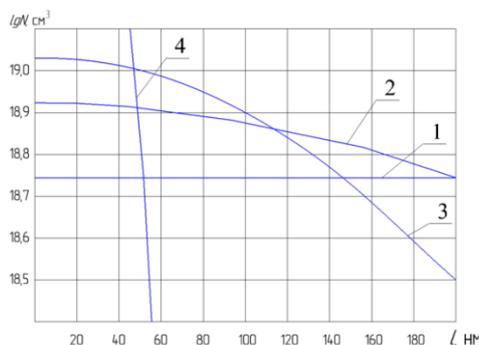


Рис. 7. Распределение примесей в областях двухдиффузионной структуры:
1 – в эпитаксиальной пленке; 2 – в диффузионной области n -типа;
3 – в диффузионной области p -типа; 4 – в области стока

Заключение. В работе рассмотрен оригинальный вариант выполнения ИПЛ-структуры, называемой двухдиффузионной, обладающей повышенной воспроизводимостью параметров, плотностью компоновки и функциональной гибкостью. Уменьшение габаритов структуры обеспечивается за счет самосовмещения областей: диффузия примесей p и n -типа, формирующих канал, выполняются в одно окно в окисле, при этом размер маски для этих областей больше этого окна.

Приведен техпроцесс изготовления СБИС на основе предлагаемой двухдиффузионной структуры, обеспечивающий ее минимальные размеры по сравнению с типовой ИПЛ-структурой за счет применения технологии самосовмещения. При этом размер ИПЛ-структуры равен минимальной ширине линий при фотолитографии для данного уровня технологии.

Приведены варианты топологии многоходовых схем ИЛИ-НЕ и Dt-триггера на основе двухдиффузионной структуры, приведена методика конструирования логических ИС с использованием данной структуры, основанная на самосовмещении областей, иллюстрирующая функциональную гибкость за счет различных вариантов объединения областей. Показано, что применение данной структуры и методики конструирования на ее основе позволит существенно сократить габариты СБИС.

Описана технология изготовления двухдиффузионной структуры, и приведено распределение примесей в различных областях структуры, обеспечивающее ее характеристики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов Л.И. О коэффициенте усиления полевого транзистора со смещением затвора в прямом направлении // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т. 20, № 6. – С. 1323-1325.
2. Грицаенко П.Г. Конструктивно-технологический вариант для СБИС на основе инжекционно-полевой логики // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 5 (207). – С. 175-183.

3. *Баталов Б.В., Кремлев В.Я., Дьяконов В.М.* Моделирование работы полевого транзистора как элемента инжекционно-полевой логики // Микроэлектроника. – 1979. – Т. 8. – Вып. 1. – С. 34-43.
4. *Дьяконов В.М., Кремлев В.Я.* Моделирование элементов инжекционно-полевых логических микросхем // Электронная промышленность. – 1979. – Вып. 4 (76). – С. 286-288.
5. *Кремлев В.Я.* Статические характеристики элементов СБИС инжекционно-полевой логики // Сб. «Технология, проектирование и надежность интегральных полупроводниковых схем». – М.: МИЭТ, 1988. – С. 122.
6. *Гарицын А.Г., Грицаенко П.Г., Левин А.Ю., Тарасов А.О.* Полевой транзистор с самосмещенным вертикальным каналом // Электронная техника. Серия 2 «Полупроводниковые приборы». – 1981. – Вып. 6 (148).
7. *Грицаенко П.Г., Кремлев В.Я., Гадков С.М.* Исследование статических параметров ИПП-инвертора. Деп. в межведомств. рефер. // Сб. «Техника, технология и экономика». Серия ЭР. – № 27. – Таганрог, 1981. – 5 с.
8. *Кремлев В.Я., Грицаенко П.Г.* Достижение пиковаттной мощности в инжекционно-полевой логике // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1981. – Т. XXIV, № 8. – С. 96-97.
9. *Аваев Н.А., Дулин В.Н., Наумов Ю.Е.* Большие интегральные схемы с инжекционным питанием. – М.: Сов.радио, 1977. – 248 с.
10. *Баринев В.В., Кремлев В.Я., Мошкин В.И., Орликовский А.А.* Интегральные схемы с инжекционным питанием // Зарубежная электронная техника. – 1973. – № 19. – С. 3.
11. *Шагурин И.И., Петросянец К.О.* Проектирование цифровых микросхем на элементах инжекционной логики. – М.: Радио и связь, 1984. – 231 с.
12. *Кремлев В.Я., Мошкин В.И.* Функционально-интегрированные элементы БИС // Электронная промышленность. – 1976. – № 5. – С. 50-61.
13. *Кремлев В.Я., Грицаенко П.Г.* Исследование структуры на взаимодополняющих биполярных транзисторах // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1988. – № 3.
14. Инжекционно-полевая структура для логических интегральных схем: Авт. свидетельство № 764567 (СССР). – Оpubл. в Бюлл. № 34, 1980.
15. *Маковийчук М.И., Паршин Е.О., Рекинский В.А.* Физические основы технологии КНИ-структур, формируемых методом ионно-лучевого синтеза // Известия вузов. Электроника. – 1998. – № 5. – С. 10-16.
16. *Пирс К., Адамс А., Кац Л., Цай Дж., Сейдел Т., Макгиллис Д.* Технология СБИС: В 2-х книгах / под ред. С.Зи. Перевод с английского. – М.: Мир: Редакция литературы по новой технике, 1986.
17. *Рудаков В.И., Денисенко Ю.И., Мочалов Б.В.* Низкотемпературный отжиг SIMOX-структур в неоднородном температурном поле // Микроэлектроника. – 2000. – Т. 29, № 5. – С. 367-373.
18. *Кривилевич С.А., Маковийчук М.И., Паршин Е.О.* Ионный синтез структур кремний-на-изоляторе. Современное состояние, новые подходы и перспективы // Микроэлектроника. – 1999. – Т. 28, № 5. – С. 363-369.
19. *Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Ревелева М.А.* Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных схем / под общей ред. чл.-корр. РАН проф. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2015. – 400 с.
20. *Светличный А.М., Наумченко А.С., Светличная Л.А., Житяев И.Л.* «Методы изоляции элементов микро- и наноструктур»: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 56 с.

REFERENCES

1. *Baranov L.I.* О коэффициенте усиления полевого транзистора со смещением затвора в прямом направлении [On the gain factor of the field transistor with forward shift of the gate], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 1975. – Vol. 20. – No. 6. – P. 1323-1325.
2. *Gritsaenko P.G.* Konstruktivno-tehnologicheskii variant dlya SBIS na osnove inzhektionno-polevoy logiki [Constructive and technological variant for VLSI based on injection-field logic], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 5 (207), pp. 175-183.

3. *Batalov B.V., Kremlev V.J., D'yakonov V.M.* Modelirovanie raboty polevogo tranzistora kak elementa inzhektionsionno-polevoy logiki [Simulation of field transistor operation as an element of injection-field logic], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 1979, Vol. 8, Issue 1, pp. 4-43.
4. *D'yakonov V.M., Kremlev V.J.* Modelirovanie elementov inzhektionsionno-polevykh logicheskikh mikroskhem [Modeling of Elements of Injection Field Logic Chips], *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic Industry], 1979, Issue 4 (76), pp. 286-288.
5. *Kremlev V.Y.* Sticheskie kharakteristiki elementov SBIS inzhektionsionno-polevoy logiki [Static characteristics of VLSI elements of injection-field logic], *Sb. «Tekhnologiya, proektirovanie i nadezhnost' integral'nykh poluprovodnikovyykh skhem»* [Coll. «Technology, design and reliability of integrated semiconductor circuits»]. Moscow: MIET, 1988, 122 p.
6. *Garitsyn A.G., Gritsaenko P.G., Levin A.Yu., Tarasov A.O.* Polevoy tranzistor s samosovmeshchennym vertikal'nym kanalom [Field-effect transistor with self-displaced vertical channel], *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2 "Poluprovodnikovye pribory"* [Electron Technics. Series 2 "Semiconductor devices"], 1981, Vol. 6 (148).
7. *Gritsaenko P.G., Kremlev V.J., Gadkov S.M.* Issledovanie staticheskikh parametrov IPL-invertora [Study of static parameters of IPL inverter], Deposited in the interagency abstract collection Technique, «Technology and Economics». Series ER, No. 27. Taganrog, 1981, 5 p.
8. *Kremlev V.Ya., Gritsaenko P.G.* Dostizhenie pikovattnoy moshchnosti v inzhektionsionno-polevoy logike [Achievement of peak power in injection-field logic], *Izvestiya VUZov. Radioelektronika* [News of Higher Educational USSR. Radioelectronics], 1981, Vol. XXIV, No. 8, pp. 96-97.
9. *Avayev N.A., Dulin V.N., Naumov Yu.E.* Bol'shie integral'nye skhemy s inzhektionsionnym pitaniem [Large injection-powered integrated circuits]. Moscow: Sov. radio, 1977, 248 p.
10. *Barinov V.V., Kremlev V.Ya., Moshkin V.I., Orlikovsky A.A.* Integral'nye skhemy s inzhektionsionnym pitaniem [Integrated circuits with injection power supply], *Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika* [Foreign electronic equipment], 1973, No. 19, pp. 3.
11. *Shagurin I.I., Petrosyants K.O.* Proektirovanie tsifrovyykh mikroskhem na elementakh inzhektionsionnoy logiki [Design of digital microcircuits based on injection logic elements]. Moscow: Radio i svyaz', 1984, 231 p.
12. *Kremlev V.Yu., Moshkin V.I.* Funktsional'no-integrirovannyye elementy BIS [Functionally integrated elements of LSI], *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic industry], 1976, No. 5, pp. 50-61.
13. *Kremlev V.Ya., Gritsaenko P.G.* Issledovanie struktury na vzaimodopolnyayushchikh bipolyarnyykh tranzistorakh [Study of the structure of complementary bipolar transistors], *Izvestiya VUZov. Radioelektronika* [Proceedings of the Universities. Radioelectronics], 1988, No. 3.
14. Inzhektionsionno-polevaya struktura dlya logicheskikh integral'nykh skhem [Injection field structure for logic integrated circuits]: Avtorskoe svidetel'stvo [Author's certificate] No. 764567 (USSR). – Published in Bulletin No. 34, 1980.
15. *Makoviychuk M.I., Parshin E.O., Rekshinskij V.A.* Fizicheskie osnovy tekhnologii KNI-struktur, formiruemykh metodom ionno-luchevogo sinteza [The physical basis of the technology of COI structures formed by the method of ion-beam synthesis], *Izvestiya VUZov. Elektronika* [News of Higher Educational USSR. Electronics], 1998, No. 5, pp. 10-16.
16. *Pierce K., Adams A., Katz L., Tsai J., Seidel T., McGillis D.* Tekhnologiya SBIS: V 2-h knigakh. [VLSI technology: In 2 books], ed. by S. Zi: Transl. from Engl. Moscow: Mir: Redaktsiya literatury po novoy tekhnike [Redaktsiya literatury po novoy tekhnike], 1986.
17. *Rudakov V.I., Denisenko Yu.I., Mochalov B.V.* Nizkotemperaturnyy otzhig SIMOX-struktur v neodnorodnom temperaturnom pole [Low-temperature annealing of SIMOX structures in an inhomogeneous temperature field], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2000, Vol. 29, No. 5, pp. 367-373.
18. *Krivilevich S.A., Makoviychuk M.I., Parshin E.O.* Ionnyy sintez struktur kremniy-na-izolyatore. Sovremennoe sostoyanie, novye podkhody i perspektivy [Ion synthesis of silicon-on-insulator structures. Current state, new approaches and prospects], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 1999, Vol. 28, No. 5, pp. 363-369.
19. *Korolev M.A., Krupkina T.Yu., Reveleva M.A.* Tekhnologiya, konstruktzii i metody modelirovaniya kremnievykh integral'nykh skhem [Technology, designs and methods of modeling silicon integrated circuits], under the general ed. chl.-corr. RAS Prof. Yu.A. Chaplygina. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2015, 400 p.

20. Svetlichny A.M., Naumchenko A.S., Svetlichnaya L.A., Zhityaev I.L. Metody izolyatsii elementov mikro- i nanostruktur: ucheb. posobie [Methods of isolation of elements of micro- and nanostructures: textbook]. Rostov-on-Don: Izd. YuFU, 2014, 56 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., член-корреспондент РАЕН А.В. Ковалев.

Грицаенко Павел Григорьевич – Южный федеральный университет; e-mail: dsp@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел. 88634393075; к.т.н.; с.н.с.; гл. специалист научно конструкторского бюро цифровой обработки сигналов.

Gritzaenko Pavel Gregory – Southern Federal University; e-mail: dsp@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634393075; cand. of eng. sc., senior researcher; chief specialist of the scientific design bureau of digital signal processing.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-137-148

И.В. Пискулин

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РТК ВН В РЕЖИМЕ АВТОНОМНОГО НАВЕДЕНИЯ

Эффективность применения автономных мобильных роботов во многом зависит от системы управления движением. Для экипажной машины вопрос подбора оптимальной скорости движения решает механик-водитель. Скорость движения автономных роботов, особенно по сильно пересечённой местности, существенно ниже и вызвано это работой автономной системы управления. В гусеничных шасси одной из составляющих быстроходности известно такое свойство, как поворотливость, которая характеризует управляемость транспортным средством в заданных условиях. Целью исследования является повышение эффективности функционирования систем автоматического управления (САУ) движением наземных робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) по курсу на основе применения метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным. Использование систем автоматического управления, эквивалентных комбинированным системам позволяет добиться повышения точности систем автоматического управления за счет уменьшения значения динамической ошибки, то есть достижение инвариантности ошибки без нарушения устойчивости системы. Задачей исследования является экспериментальное определение зависимостей установившегося значения ошибки воспроизведения угла курса при постоянном и линейном входных воздействиях в одноконтурных и двухконтурных системах автоматического управления движением РТК. В ходе работы предложено составить структурные схемы систем автоматического управления движением РТК ВН по углу курса, на основании структурных схем разработать модели для проведения экспериментальных исследований предложенного подхода методами компьютерного моделирования. В ходе исследования предлагается провести анализ точности воспроизведения угла курса на основе полученных в результате моделирования данных. В рамках проводимых работ рассмотрена задача построения систем управления движением автономных мобильных гусеничных машин и роботов. Предложена модель системы автоматического управления движением гусеничных РТК на основе применения метода двухконтурных систем, эквивалентных комбинированным. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного подхода и показывают, что удастся получить улучшенные показатели функционирования системы управления по точности и оперативности. Предложенный в статье метод позволяет решать задачу повышения эффективности работы системы управления движением РТК по углу курса в автономном режиме.

Робототехнический комплекс; система управления движением; угол курса; метод двухконтурных систем; модель; моделирование.