

УДК 621.382

## МИКРОЭЛЕКТРОНИКА: КМОП-СТРУКТУРЫ (Обзор исследований в России)

*И. С. Байков,*

Всероссийский научно-исследовательский институт  
межотраслевой информации, Москва, Россия

*А. И. Байков,*

Московский государственный университет путей сообщения, Москва, Россия

*Дана краткая информация об основных научных и производственных центрах России, ведущих исследования и разработки в области КМОП-технологии микроэлектроники, которая сейчас является наиболее распространенной технологией изготовления ИС. Представлены основные физико-технологические принципы разработки КМОП-приборов, современные направления фундаментальных и прикладных работ, в частности, в области сверхкомпактных быстродействующих СБИС субмикронного диапазона. Обсуждается проблема обеспечения материально-технологической базы микроэлектроники. Представлена справочная информация о номенклатуре выпускаемых промышленностью КМОП-СБИС и новых перспективных разработках.*

Современная микроэлектроника — ключевая отрасль, определяющая экономический прогресс любой развитой страны мира. Основу микроэлектроники составляет производство интегральных микросхем. Каждое новое поколение ИС связано с созданием принципиально новых подходов к технологии изготовления и новых технологических методов, отражающих последние достижения мировой науки. Текущий этап развития микроэлектроники связан со сверх- и ультрабольшими интегральными схемами. Мировой опыт говорит, что в среднем новая технология СБИС вводится каждые три года. С каждым новым поколением ИС их минимальный топологический размер уменьшается приблизительно на 70 %, размер чипа уменьшается примерно в 1,6 раза, в то время как технологический процесс усложняется на два критических уровня. В ряде стран (США, Япония) уже преодолен микронный топологический барьер размеров элементов и освоен промышленный выпуск изделий с топологическими нормами 0,2—0,3 мкм. В России промышленностью освоен диапазон 1,5—2 мкм, и только в отдельных лабораториях создаются изделия с топологическими нормами 0,8—1 мкм. Налицо безусловное отставание микроэлектроники России на одно-два поколения ИС, т. е. не менее чем на шесть лет.

В кратком обзоре трудно проследить весь путь создания ИС — от исходного кремния-сырца до получения полностью сформированных, упакованных в герметические корпуса и испытанных на надежность ИС. Цель статьи — осветить принципиальные аспекты создания ИС на основе КМОП-технологии, которая в настоящее время является наиболее широко используемой для производства полупроводниковых приборов, а также имеет очень обнадеживающие перспективы на будущее; рассказать о государственных программах развития микроэлектроники в России на ближайшие годы; познакомить читателя с ведущими разработчиками и производителями КМОП-приборов; обсудить достоинства и недостатки технологических приемов и методов, используемых российской промышленностью при производстве КМОП-приборов или разработанных в научно-исследовательских институтах; оценить их перспективность в совершенствовании технологии микроэлектроники; указать возможные пути дальнейшего развития технологических процессов.

В работе также демонстрируются производственные возможности российских предприятий, поскольку затянувшийся экономический кризис в России привел к значительной недогрузке их производственных мощностей, резкому сокращению ассигнований на НИОКР и технологическое переоснащение предприятий. Вот почему наша электронная промышленность весьма заинтересована во внешних инвестициях и во взаимно выгодном научно-техническом сотрудничестве.

### НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ РОССИИ ПО РАЗРАБОТКЕ И ВЫПУСКУ КМОП-ПРИБОРОВ

В бывшем СССР насчитывалось более 900 предприятий и организаций, которые занимались разработкой и выпуском изделий электроники [1]. Примерно 120 из них занимались разработкой и выпуском интегральных микросхем. На начало перестройки (конец 80-х годов) ежегодное производство ИС достигло 100 млн. шт. В результате распада СССР около 1/3 предприятий электронной промышленности оказалось за территорией России. В настоящее время можно указать ряд исследовательских и промышленных центров России, которые занимают ведущее положение по разработке, промышленному освоению и выпуску ИС, прежде всего СБИС, а также специального технологического оборудования (СТО) для их производства. В данной работе основное внимание уделено предприятиям, разрабатывающим и производящим КМОП-схемы и необходимые материалы и оборудование, а среди них — прежде всего целая плеяда НИИ и заводов, сосредоточенных в городе Зеленограде, в российской “Кремниевой долине”. Здесь находится крупнейшее объединение научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий России в области микроэлектроники — АО Научно-производственный концерн “Научный центр”. Развитая инфраструктура, выгодное территориальное расположение вблизи Москвы, соседство предприятий, разрабатывающих и выпускающих специальные материалы для микроэлектроники, позволило предприятиям АО НПК “Научный центр” стать лидерами в области микроэлектроники России. В состав АО НПК входят НИИ точной технологии с заводом “Ангстрем”, НИИ “Научный центр” с заводами “Квант” и “Логика”, НИИ молекулярной электроники с заводом “Микрон”, НИИ точного машиностроения с заводом “Элион” и другие предприятия.

Предприятия АО НПК разрабатывают и выпускают:

- стандартные серии цифровых логических ИС типа ТТА, ТТАШ, КМОП, ЭЛС на кремнии и арсениде галлия;
- микросхемы полупроводниковой памяти ДОЗУ и СОЗУ (НМОП, КМОП, биполярные);
- микропроцессоры и микропроцессорные комплекты 8-, 16- и 32-разрядные;
- полузаказные микросхемы на основе базовых матричных кристаллов (БМК) от 20 до 100 тыс. вентилях на кристалл;
- вычислительную технику и периферийные устройства, телекоммуникационные системы;

СТО для отжига, окисления, диффузии, плазмохимического травления, электронно-лучевой и лазерной обработки, ионного легирования, получения полупроводниковых материалов в космосе, систем экологического обеспечения; бытовую электронику.

В НПО “Субмикрон” (г. Зеленоград) входят НИИ физических проблем им. Ф. В. Лукина, занимающийся развитием физико-технологического базиса новых поколений изделий микроэлектроники; НИИ физики твердого тела и НИИ особо чистых материалов, разрабатывающие новые материалы для микроэлектроники, и др. Отметим также НПО “Элас”, куда входит НИИ “Микро-прибор” с заводом “Компонент”, выпускающее ИС и изделия ЭТ для радиосистем и систем спутниковой связи, и НПО “Элма”, производящее эпитаксиальные структуры и материалы для ИС и полупроводниковых приборов (монокристаллы элементарных полупроводников, пластины кремния).

В г. Зеленограде находится также Московский государственный институт электронной техники, который готовит специалистов для электронной промышленности. При институте создан НПК "Технологический центр", который с 1990 г. начал выпуск КМОП ИС. Производственные мощности НПК позволяют изготавливать до 1000 кремниевых пластин (диаметром 100 мм) в месяц и разрабатывать до 20 оригинальных проектов БИС и микропроцессорных сенсоров в год.

Одним из крупнейших в России является Воронежский Научно-производственный центр электронной техники [2], в состав которого входят три НИИ, одно СКБ и семь заводов, расположенных в основном в Воронежской области. НПЦЭТ специализируется на разработке и производстве элементной базы микроэлектроники широкого применения на основе КМОП- и БиКМОП-технологий: универсальные микропроцессоры и микропроцессорные комплексы; однокристалльные микропроцессоры цифровой обработки сигналов; однокристалльные микроЭВМ; логические ИС широкой номенклатуры; цифровые и аналого-цифровые преобразователи; интегральные фильтры на переключаемых конденсаторах на частоты звукового диапазона;

БМК и матричные ИС на их основе;

программируемые пользователем логические ИС (ППЛИС);

изделия микроэлектроники для видеотехники, телевидения, средств связи, телефонии, автоэлектроники и др.

Центр разрабатывает и производит микро- и мини-ЭВМ для САПР, управления оборудованием, комплексные линии фотолитографии и очистки, измерительные комплексы для СБИС, оборудование для заключительных испытаний, комплексы очистки воды и агрессивных сред.

В Москве находится ряд предприятий и заводов, разрабатывающих и выпускающих КМОП ИС и полупроводниковые приборы на их основе. В их числе НПО "Микроэлектроника", НИИ микроэлектроники и нанотехнологии (аналоговые ИС, ЗУ, СТО), НИИ "Пульсар" (ОЗУ, ПЗС, матричные фотоприемные устройства), Московский электроламповый завод (МЭЛЗ) и др.

В С.-Петербурге надо указать Физико-технический институт РАН, который разрабатывает физико-технологическую базу и проектирует ИС и полупроводниковые приборы, и АО "Светлана", производящее специализированные ИС и полупроводниковые приборы.

НИИ полупроводниковых приборов (г. Томск) разрабатывает и производит ИС и приборы на основе арсенида галлия. НИИПП разработал ИС для 32-рядного синтезатора частоты, аналоговой и цифровой обработки сигналов, цифрового селектора каналов телеприемника, маломощных усилителей для систем связи.

### РОССИЙСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Перспективы развития отечественной микроэлектроники определены в рамках Российской государственной программы развития электронной техники на период 1994—2000 гг., утвержденной постановлением Правительства РФ от 6 мая 1994 г. № 453 [3]. Отметим отдельные положения этой программы, касающиеся микроэлектроники. С целью выхода отечественной электроники на уровень, соответствующий мировым стандартам и конкурентоспособный, необходимо:

разработать новые технологии создания ИЭТ, определяющих технический уровень систем информатики, управления, связи, транспорта, медицины, вооружения и военной техники, товаров народного потребления, приборов и устройств топливно-энергетического комплекса и др.;

разработать субмикронные технологии с минимальными топологическими нормами 0,3—0,1 мкм, обеспечивающие создание схем с уровнем интеграции до

10 млрд. элементов на кристалл (в настоящее время этот показатель не превышает 5 млн.);

создать новое поколение СВЧ-приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с повышенной выходной мощностью;

организовать современные производства конкурентоспособных на мировом рынке ИЭТ;

создать производственные мощности, обеспечивающие к 2000 г. увеличение объемов производства с учетом их новых технологических модификаций ИС в 5,7 раза, полупроводниковых приборов — в 1,7 раза и т. д.

Программа включает в себя четыре подпрограммы, определяющие ее основные задачи и пути их решения.

**Подпрограмма 1** “Электронная элементная база” содержит проекты по созданию ИЭТ, необходимых для обеспечения систем общепромышленного и военного назначения.

В отдельные разделы подпрограммы выделены проекты по разработке ИЭТ для систем управления и обеспечения безопасности на атомных энергообъектах, а также работы в условиях воздействия сильных электромагнитных полей.

**Подпрограмма 2** “Фундаментальные и поисковые исследования” включает перечень проектов исследований в приоритетных областях ЭТ, проводимых институтами промышленности, Академии наук и Высшей школы РФ.

**Подпрограмма 3** “Электронные технологии” содержит проекты по созданию технологических процессов, необходимых для разработки и производства электронных компонентов, решения проблем экологии, стандартизации, надежности и качества.

**Подпрограмма 4** “Ресурсное обеспечение” охватывает вопросы, связанные с развитием обеспечивающих отраслей промышленности: материаловедения, электронного машиностроения, аналитического и измерительного оборудования; в отдельные разделы выделены капитальное строительство, создание чистых производственных помещений и проекты с привлечением иностранных инвестиций.

Программа наряду с электронизацией народного хозяйства предусматривает обеспечение систем оружия и военной техники современными ИЭТ, т. к. электронная технология по своему содержанию универсальна и является технологией двойного применения.

В то же время такие направления ЭТ, как микроэлектроника, СВЧ-приборы, устройства отображения информации, квантовая электроника и другие, используемые в современных системах точного наведения, радиоэлектронной борьбы, радиолокации и связи, имеют свою специфику и разрабатываются по комплексно-целевым программам создания систем военного назначения.

В области микроэлектроники необходимо значительно развить и обновить имеющиеся мощности, провести большой объем фундаментальных и поисковых исследований, разработать и освоить новые технологии создания функционально сложных ИС. Главная задача — максимально насытить собственный рынок и выйти на мировой.

Параллельно с развитием технологии микроэлектроники должна быть создана разветвленная сеть коллективных центров по проектированию специализированных и полузаказных ИС на базе мощных вычислительных систем на верхнем уровне и современных рабочих станций проектирования на нижнем уровне пользователей.

Стратегия развития технологии основана на качественном переходе к формированию структур с более малыми размерами: от технологии 2—1,5 мкм к технологии уровней 1; 0,8; 0,5; 0,3 мкм. Уменьшение размеров структур требует перехода к новым технологическим приемам их формирования, строгого контроля энергетического воздействия, стабилизации технологических температурных условий до уровня нескольких сотых градуса, контроля концентрации до тысячных долей процента, введения комплексного мониторинга технологических пара-

метров. Переход в субмикронную область сопровождается не только уменьшением размера элементов, но и повышением степени интеграции СБИС, что приводит к необходимости повышения прецизионности, улучшения воспроизводимости технологических обработок и снижения уровня вносимых дефектов.

Создание технологического базиса нового уровня невозможно без обеспечения разработки сверхчистых материалов и, в первую очередь, решения проблемы выпуска кремниевых пластин диаметром 200—250 мм с требуемым уровнем совершенства кристаллической структуры.

Развитие технологии должно идти по пути все большей интеграции отдельных процессов в микроциклы, автоматизации производственного процесса на основе кластерного СТО. Задача формирования низкодефектных структур СБИС будет решаться путем введения систем сверхчистых производств, включающих в свою инфраструктуру комплексы чистых помещений, системы ультрафильтрации реактивов и газов, системы экологического мониторинга.

Предстоит создать новое поколение сверхминиатюрных приборов квантовой нанoeлектроники, в том числе ИС на эффекте размерного квантования, атомарных ЗУ, трехмерных ИС, найти пути технологической реализации функциональных структур на новых принципах действия с функционально активными слоями толщиной 4—2 нм (нанотехнология, атомная сборка).

Реализация этих задач обеспечит выход на качественно новый уровень основных параметров приборов: степень интеграции СБИС до  $10^8$ — $10^{10}$  элементов на кристалл, высокоскоростная обработка сигнала в пико- и субпикосекундном диапазоне, размер элементов 3—1 нм, емкость памяти до сотен Гбит и более.

**Ресурсное обеспечение.** Большую часть материалов выпускают промышленные предприятия РФ, в том числе электронной промышленности. Однако в настоящее время более 180 материалов закупают по импорту из-за отсутствия их производства или недостаточных мощностей заводов-изготовителей [4].

Предусматриваются разработка импортозамещающих материалов, производство материалов, выпускаемых странами СНГ, прежде всего монокристаллического кремния.

Намечен большой объем исследований в области субмикронной технологии, нанотехнологии, прецизионных исследований гетерофазных процессов, поверхностей, границ раздела, структуры и химического состава материалов. Предусматривается повышение качества полупроводниковых материалов, создание пластин кремния и арсенида галлия больших диаметров с плотностью дислокаций менее  $10 \text{ см}^{-2}$  и других полупроводниковых соединений с низким содержанием дефектов и регулируемым в процессе выращивания примесным составом, создание и применение в электронике новых классов материалов (сверхрешетки, органические проводники, алмазоподобные материалы и т. д.), синтез органических материалов для создания фото-, рентгено- и электронорезистов.

Предполагается развитие МОС-гидридной технологии эпитаксиальных гетероструктур и технологии прецизионного химического и ионного травления слоев и меза-структур. Разрабатывается специальное оборудование для фотолитографии с использованием лазеров с длиной волны 200—190 нм и для практической реализации методов электронно-, ионо- и рентгенолитографии, нетрадиционных методов формирования изображения. Создается новое поколение оборудования кластерного типа для процессов плазменного травления, радиационно-стимулированного формирования функциональных слоев и т. д.

#### **ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КМОП-СТРУКТУР И ИЭТ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ [5]**

Российская военная доктрина основывается на следующем постулате: все вооружение Армии и Флота РФ создается на отечественной электронике, отвечающей жестким требованиям по комплексу параметров, в том числе по устойчи-

ности к воздействию ионизирующих излучений и факторов космического пространства.

Приоритетными направлениями исследований в области микроэлектроники для создания вооружений являются следующие:

разработка технологической базы широкой номенклатуры КМОП СБИС ЗУ с информационной емкостью по динамическим ЗУ — 256 Мбит — 1 Гбит, по статическим ЗУ — 16—64 Мбит; разработка ЗУ на арсениде галлия и структурах КНС/КНИ емкостью до 256 Кбит с быстродействием 2—5 нс и повышенной радиационной стойкостью для ЭВМ военных спутниковых систем;

мини-ЭВМ на основе БМК повышенной надежности с числом вентиляей на кристалл 1 млн и временем задержки 0,2—0,3 нс;

микропроцессоры повышенной функциональной сложности на кремнии с разрядностью до 64—128 бит и производительностью до  $10^8$ — $10^9$  операций в секунду и на арсениде галлия с разрядностью 32—64 бит и производительностью до  $2 \cdot 10^8$ — $10^{10}$  операций в секунду, которые характеризуются стойкостью к ионизирующему излучению и сохраняют функциональную способность в широком диапазоне температур;

новые однокристалльные вычислительные системы с плотностью  $10^7$ — $10^8$  эквивалентных логических элементов увеличат производительность ЭВМ и аппаратуры, разработанной на их основе, до  $10^9$  операций в секунду и срок службы на космических ЛА до 25 лет;

устройства преобразования данных (ЦАП, АЦП), в том числе прецизионные, на 16—20 двоичных разрядов, быстродействующие и сверхбыстродействующие на 6—12 двоичных разрядов, в том числе с самокоррекцией систематических ошибок и с самодиагностикой, для радиолокации, телевидения, прецизионных измерений и автоматизированных систем управления;

разработка научных основ нанотехнологии с целью изучения возможности создания сверхминиатюрных суперЭВМ производительностью до  $10^{12}$  операций в секунду, аналоговых устройств СВЧ-техники для средств радиоэлектронной борьбы, работающих в диапазоне частот до 10 ГГц, систем обнаружения целей с минимальной отражающей поверхностью, обладающих высокой степенью помехоустойчивости за счет использования фазовой обработки широкополосных сигналов.

### **ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ КМОП-ПРИБОРОВ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПЛОТНОСТИ УПАКОВКИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ИС**

Предложенная в 1963 г. технология комплементарных МОП-структур заключается в формировании n- и p-канальных МОП-транзисторов на одном кристалле. В настоящее время КМОП-технология является ведущей технологией создания СБИС и УБИС.

КМОП-схемы позволяют иметь широкие допуски на технологические разбросы параметров и допускают большую гибкость в топологии. Поэтому преимущественное распространение получили средства автоматизированного проектирования (САПР), которые позволяют разрабатывать КМОП СБИС (от технических требований до топологии кристалла) за несколько недель. В связи с продолжающимся сокращением минимальных топологических элементов ИС сегодня на одном кристалле можно разместить до  $10^8$  транзисторов. Разработанные средства автоматизации производства позволяют выпускать КМОП-схемы высокого уровня сложности с выходом годных 60—90 %.

КМОП-схемы представляют собой прежде всего схемное решение, где используются характеристики p-МОП- и n-МОП-транзисторов для обеспечения ряда нужных качеств при минимуме отрицательных. В настоящее время разрабо-

таны разнообразные цифровые КМОП-схемы, матричные структуры для заказных ИС и оригинальные решения для аналоговых КМОП-схем.

Отличия КМОП-схемы: высокая помехоустойчивость, широкий диапазон рабочих напряжений питания и температур, малые управляющие токи, очень низкая потребляемая мощность, высокое быстродействие и достаточно высокая плотность упаковки, простота проектирования. КМОП-схемы удобны для масштабирования до субмикронных размеров; они имеют более высокие рабочие показатели и надежность по сравнению с другими типами ИС. По всем этим причинам КМОП-технология заняла лидирующие позиции в производстве СБИС.

Недостатки КМОП-схем: эффект защелкивания, чувствительность к электростатическим разрядам, большее количество транзисторов на одну схемную функцию, невысокая токовая нагрузочная способность и др. — успешно преодолеваются по мере их развития.

Базовым логическим вентилем является КМОП-инвертор, электрическая схема, структура и некоторые характеристики которого представлены на рис. 1. В подложке *n*-типа формируют *p*-канальный транзистор, а *n*-канальный транзистор формируют в области *p*-типа, которая создается в той же самой подложке *p*-типа. Область *p*-типа проводимости выступает в роли подложки для *n*-канального транзистора, ее называют *p*-карманом. Затворы *n*- и *p*-канального транзистора соединены между собой и являются входом инвертора, а соединенные стоки обоих приборов — выходом инвертора. Пороговое напряжение *n*- и *p*-канальных транзисторов обозначим соответственно  $U_n$  и  $U_p$  ( $U_p < 0$ ). На рис. 1, в представлена зависимость выходного напряжения  $U_0$  инвертора от величины входного напряжения  $U_1$ . При  $U_1 = 0$  *n*-канальный транзистор закрыт ( $U_1 \ll U_n$ ), в то время как *p*-канальный транзистор находится под высоким потенциалом  $U_{DD}$ , который более отрицателен, чем  $U_p$ . Следовательно,  $U_0 = U_{DD}$ . При возрастании  $U_1$  от нулевого значения *n*-канальный транзистор начинает открываться, а *p*-канальный — закрываться. Как только  $U_1$  становится больше ( $U_{DD}, |U_p|$ ),  $U_0 = U_{SS}$ .

Характерной особенностью таких КМОП-вентилей является то, что в любом логическом состоянии ( $U_0 = U_{SS}$  или  $U_0 = U_{DD}$ ) транзисторы закрыты, и величина тока, протекающего по цепи между  $U_{DD}$  и  $U_{SS}$ , пренебрежимо мала. Эта особенность продемонстрирована на рис. 1, г, где ток через инвертор  $I_{DD}$  показан как функция  $U_1$  (сплошная линия). Заметный ток протекает через эту КМОП-схему только тогда, когда оба транзистора включены одновременно, т. е. в ходе их переключения из одного состояния в другое. Небольшое потребление мощности — наиболее важное преимущество КМОП-схем. КМОП-вентиль переключается непосредственно информационным сигналом и не требует внешнего тактового сигнала. Передаточная характеристика инвертора напряжения слабо зависит от соотношения геометрических размеров *p*- и *n*-канальных транзисторов, поэтому КМОП-техника нашла широкое применение в качестве базы для различных видов проектирования схем на разнотипных (комбинированных) ячейках.

Принято различать статические КМОП-схемы, когда каждому *n*-канальному транзистору соответствует *p*-канальный, и динамические, у которых транзисторы одного типа преобладают в количественном отношении над транзисторами другого типа.

Разработано множество технологических процессов изготовления КМОП ИС, каждый со своими достоинствами и недостатками. Топологическая плотность размещения транзисторов в КМОП-схемах ограничена, поскольку необходимо оставлять изолирующие области между *n*- и *p*-канальными приборами и предотвращать эффект защелкивания, обусловленный включением паразитного тиристора, присущего КМОП-схемам четырехслойной *p*-*p*-*n*-*p*-структуре.

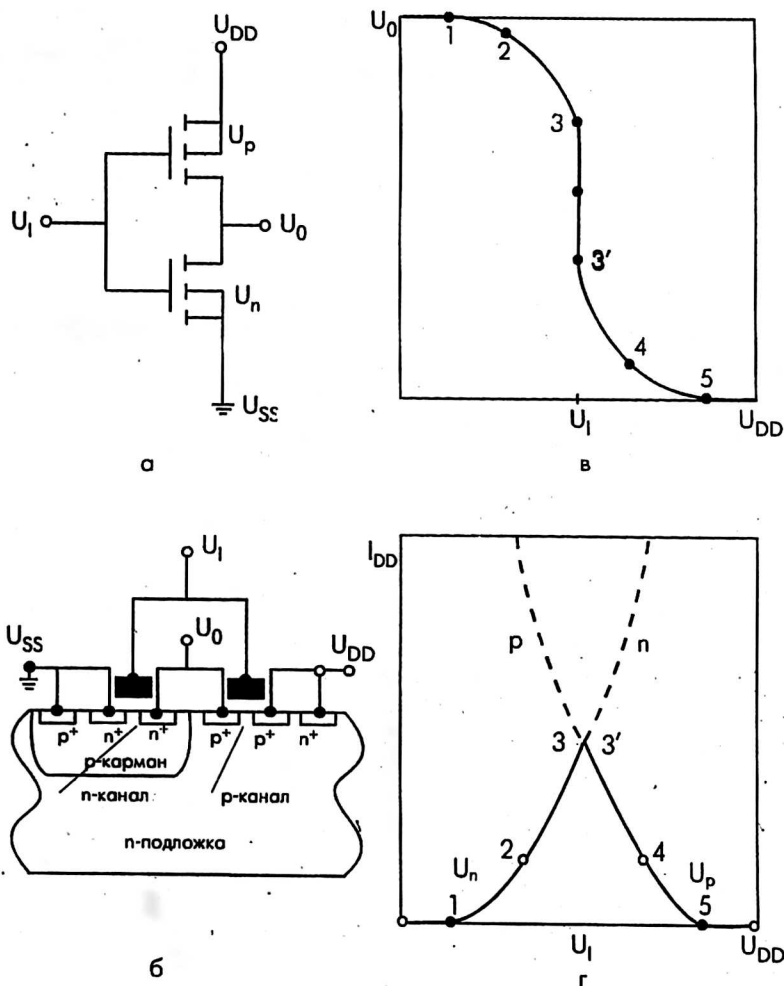


Рис. 1. КМОП-инвертор:  
 а — электрическая схема; б — структура;  
 в, г — вольт-ампер-ые характеристики

Достижение все более высокой степени интеграции СБИС требует непрерывного уменьшения размеров всех основных компонентов схемы.

Основные ограничения для уменьшения размеров МОП-транзисторов следующие:

- минимальная энергия переключения;
- статические флуктуации легирующих атомов;
- воспроизводимые фотолитографией размеры;
- физический пробой подзатворного диэлектрика или пробой стокового p-n-перехода;
- прокол между областями стока и истока;
- возможность отвода тепла от ИС;
- эффекты, обусловленные горячими электронами.

Развитие современных полупроводниковых технологий позволило преодолеть многие из вышеуказанных ограничений.

Фотолитография уже не является ограничивающим фактором для уменьшения размеров ИС: современные оптические методы позволяют получать элементы с топологическим размером вплоть до 0,1 мкм, а лазерная, электронно-лучевая и рентгеновская литография — продвинуться еще дальше. Проблема пробоя подзатворного диэлектрика и ударной ионизации носителей заряда в области канала теряет свою остроту с уменьшением напряжения источника питания менее 3 В.

С использованием тугоплавких металлов или силицидов на областях стоков-истоков на порядок уменьшаются паразитные сопротивления этих областей и поликремниевых затворов. Достижения криогенной техники позволяют довести уровень рассеиваемой мощности до десятков ватт на  $1 \text{ см}^2$ . Наиболее серьезные проблемы возникают при переходе к КМОП-приборам с эффективной длиной канала менее микрона, но и здесь можно найти нужные решения.

Резюмируя вышесказанное, можно утверждать, что существующая КМОП-техника находится еще довольно далеко от физического предела работоспособности ее базовых элементов.

Таким образом, дальнейшее повышение степени интеграции и быстродействия КМОП ИС определяется достигнутым уровнем технологических процессов, а также конструктивными особенностями проектируемых СБИС, особенно качеством изоляции разных полупроводниковых приборов, выполняемых в общей полупроводниковой подложке.

В КМОП-технологии прежде всего необходимо сделать выбор между структурами с карманами р-типа (см. рис. 1), n-типа и карманами обоих типов проводимости (рис. 2). Исторически первоначально наиболее широкое распространение в производстве КМОП-схем получила технология с карманами р-типа, которая требует минимального числа технологических операций и обеспечивает хорошую симметрию параметров р- и n-МОП-транзисторов. КМОП-технология с карманами n-типа, совместимая с промышленной n-МОП-технологией с кремниевыми затворами, дает повышенные рабочие характеристики n-канальных транзисторов, которые в этом случае изготавливаются непосредственно в подложке без инверсии типа ее проводимости. В динамической логике отношение числа транзисторов одного типа проводимости к числу транзисторов другого типа проводимости может быть весьма большим, поэтому представляется естественным в качестве преобладающих в схеме транзисторов выбрать те, которые обладают более высокими характеристиками, поэтому для ИС, состоящих в основном из логических схем, выбирают технологию с карманами n-типа. Аналогичные доводы справедливы и для большинства ЗУ, матрицы запоминающих ячеек которых выполняются в основном на транзисторах одного типа проводимости.

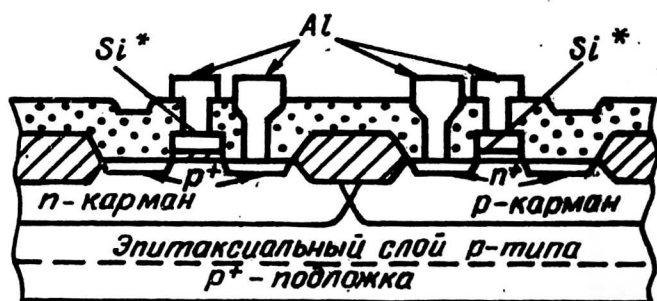


Рис. 2. КМОП-прибор с n- и p-карманами

Затем нужно выбрать тип эпитаксиальной подложки (n на  $p^+$  или p на  $p^+$ ). В силу того, что энергетические требования к ионному легированию кармана намного ниже, чем в случае n-кармана с обратным профилем легирования, обратный профиль легирования кармана легче получить на подложках p-типа. И наоборот, в n-МОП-схеме с небольшим числом КМОП-приборов подложка должна быть p-типа.

В качестве примера можно привести разработанный НИИЭТ (г. Воронеж) в конце 80-х гг. КМОП-технологический процесс с p-карманом, двумя уровнями металлизации и 2-мкм проектными нормами, а в дальнейшем с 1,5-мкм, который был внедрен в промышленность [6]. При выборе типа проводимости кармана для

реализации сложных быстродействующих КМОП-схем были приняты во внимание достоинства логики "домино". В этом случае как рабочие характеристики, так и необходимое число транзисторов в вентиле определяются параметрами п-канальных транзисторов. При размещении последних вне кармана значительно улучшается их проводимость и уменьшаются паразитные емкости переходов, повышается плотность упаковки, поскольку для большинства транзисторов не требуются контакты к карману.

Исходный материал — кремниевая подложка р-типа с высоким удельным сопротивлением, ориентированная в плоскости (100). С целью изготовления устойчивых к защелкиванию КМОП-схем было принято несколько решений (изготовление КМОП ИС в эпитаксиальных слоях на низкоомной подложке было отклонено из-за высокой стоимости таких подложек по сравнению с монокристаллическими). В области топологии — это использование во всех входных и выходных каскадах только п-канальных транзисторов, отделение всех входных и выходных каскадов от остальных областей КМОП-кристалла охранными кольцами, использование локальных заземляющих контактов по всей длине транзистора во всех внутренних р-канальных транзисторах, выполняемых в карманах. С точки зрения технологических методов — это создание имплантированных слоев с высокой концентрацией примеси под изолирующим окислом, снижающих сопротивление подложки и кармана; создание качественных переходов в область п-подложки с целью снижения эффекта ударной ионизации вблизи стокового перехода и уровня токов в подложке; формирование глубоких охранных колец, самосовмещенных с карманами; оптимизация профиля распределения примеси в канале и параметров р-канальных транзисторов при относительно высоком уровне легирования карманов п-типа.

Основные этапы формирования разработанного технологического процесса сводятся к следующему. В кремниевой подложке р-типа формируются п-карманы легированием ионами фосфора через тонкий слой окисла в окнах фоторезистивной маски. После удаления слоев окисла и фоторезиста на областях карманов создают повторно слой окисла при низкой температуре и разгоняют примесь в карманах на глубину 4,0 мкм при 1200 °С в инертной среде. Такой способ формирования карманов обеспечивает высокую воспроизводимость поверхностной концентрации примеси в карманах за счет исключения перераспределения примеси на границе раздела кремний — окисел в процессе высокотемпературной обработки. После удаления исходного окисла создаются слои окисла и нитрида кремния для проведения LOCOS-процесса. С помощью фотолитографии и плазмохимического травления раздельно формируются области транзисторов р-типа в карманах и легируются области изоляции этих транзисторов ионами фосфора (фоторезист при этом не удаляется), а потом активные области транзисторов п-типа в подложке с соответствующим легированием областей изоляции этих транзисторов ионами бора.

Такой способ формирования активных и охранных областей обоих типов транзисторов позволяет гибко и независимо варьировать дозу и энергию легирования примесями в охранных областях в широких пределах и создавать имплантированные слои с высокой концентрацией под изолирующим окислом. Максимальная концентрация примеси ограничивается требованиями к напряжению пробоя исток-стоковых областей МОП-транзисторов. За счет этого снижается сопротивление тел подложки и кармана и вероятность защелкивания КМОП-структур. Кроме того, исключается вероятность проникновения ионов примеси в области каналов транзисторов через маску из фоторезиста и нитрида кремния и неконтролируемое изменение концентрации примеси.

Далее перед созданием изолирующего окисла методом термокомпрессионного окисления при 950 °С введена предварительная разгонка примеси в охранных областях при 1000 °С, которая гарантирует исключение утечек транзисторов п-типа на краю окисной изоляции за счет опережения фронтом боковой диффу-

зии примеси бокового распространения окисла под нитридную маску. После формирования окисной изоляции удаляется маска из нитрида и окисла кремния и создается подзатворный окисел при  $1000^{\circ}\text{C}$  в среде сухого кислорода с 5 % хлористого водорода. С помощью легирования ионами бора через затворный окисел создается глубокая имплантированная область, которая служит эквивалентом кармана, предотвращая смыкание обедненных областей в транзисторах *n*-типа, и проводится подгонка порогового напряжения обоих типов транзисторов. Необходимые параметры этих транзисторов обеспечиваются оптимизацией профилей распределения примесей в областях кармана и каналов транзисторов. Затем осаждается из газовой фазы слой поликремния, легированный фосфором, из которого формируется топологический рисунок затворов и межсоединений плазмохимическим способом.

На следующем этапе селективно, используя фотолитографию, легируются исток-стоковые области транзисторов *n*-типа ионами мышьяка. Термический отжиг для активации донорной примеси проводится одновременно с созданием термического окисла толщиной 0,2 мкм на исток-стоковых областях *n*-типа и поликремниевых затворах. Затем селективно легируются ионами бора исток-стоковые области транзисторов *p*-типа. При формировании исток-стоковых областей активация только донорной примеси двухстадийным длительным термическим отжигом полностью устраняет радиационные нарушения структуры, вызванные имплантацией мышьяка, обеспечивает формирование качественных переходов в подложке. За счет этого уменьшаются уровень токов в подложку и вероятность защелкивания. В исток-стоковых областях транзисторов *p*-типа акцепторная примесь не подвергается разгонке при длительной высокотемпературной обработке, что предотвращает смыкание исток-стоковых областей *p*-типа. Благодаря созданию термического окисла на боковых стенках и поверхности поликремниевых затворов снижаются паразитные емкости перекрытия исток-сток затвором для обоих типов транзисторов и повышается надежность межслойной изоляции.

Перед осаждением фосфоросиликатного стекла (ФСС) селективно вскрываются контактные окна в термическом окисле жидкостным методом к активным областям *n*-типа и поликремниевым затворам. Уплотнение межслойной изоляции обеспечивает сглаживание рельефа структур, активацию примеси *p*-типа и диффузию фосфора из фосфоросиликатного стекла в контактные области исток-стоковых областей *n*-типа. Сформированные таким образом погруженные контактные области *n*-типа исключают утечки и деградацию переходов в местах контактов. Вскрытие контактных окон в межслойной изоляции проводится плазмохимическим способом. После напыления первого слоя алюминия с 1 % кремния создается топологический рисунок металлизации нижнего уровня. Межуровневая изоляция формируется из двух слоев плазмохимического и пиролитического окислов с планаризацией поверхности структур. Во втором слое алюминия с 1 % кремния создается топологический рисунок металлизации верхнего уровня. Формирующий отжиг проводится при  $450^{\circ}\text{C}$ .

На базе данной технологии в НИИЭТ разработан ряд цифровых схем: цифровые процессоры обработки сигналов, 16-разрядные микропроцессоры и контроллеры широкого назначения, вентильные матрицы на 15—30 тыс. вентиляей.

В 1994 г. в НИИЭТ на базе имеющегося СТО и совершенствования фотолитографических и плазмохимических процессов, обеспечивающих формирование элементов с топологическими нормами 1,5 мкм и воспроизводимый уход размеров относительно фотшаблона и точность совмещения не более 0,25 мкм, был разработан КМОП-технологический процесс с *n*-карманом, двумя уровнями металлизации и 1,5-мкм проектными нормами. Среди технологических усовершенствований в этой новой разработке следует отметить:

использование при формировании изоляции КМОП-структур технологического варианта с двумя самосовмещенными карманами, поскольку из-за уменьшения

расстояния между транзисторами p- и r-типа возрастает вероятность защелкивания паразитных структур;

создание исток-стоковых областей транзисторов p-типа методом двойной диффузии (имплантация ионов фосфора и мышьяка) для предотвращения инжекции горячих электронов в подзатворный окисел и носителей в подложку;

формирование погруженных контактных областей p<sup>+</sup>-типа путем селективной имплантации ионов фосфора после вскрытия контактных окон, активации, совместимых с необходимым оплавлением рельефа контактных окон размером 1,5 мкм с целью улучшения качества покрытия ступеньки осаждаемым затем металлом;

использование антиотражающих покрытий из нитрида титана поверх алюминиевых слоев при формировании двухуровневой металлизации, обеспечивающих качественное формирование топологического рисунка разводки и исключение закороток на рельефе структур при малых зазорах между шинами.

На базе этой технологии разрабатывается ряд высокопроизводительных 16-разрядных микропроцессоров и контроллеров, цифровых процессоров обработки сигналов, вентиляльных матриц на 50 тыс. вентиляей, программируемых логических интегральных схем.

В НИИЭТ также разработан комбинированный технологический процесс изготовления на одном кристалле КМОП-схем с аналого-цифровыми блоками высокой степени интеграции, в которых, кроме КМОП-структур, необходимо применение высококачественных конденсаторов и высокоомных резисторов для аналоговых элементов. Этот процесс использует базовую КМОП-технология с 2-мкм проектными нормами, с карманом p-типа, одним уровнем поликремния и двумя уровнями металлизации, а также аналоговый технологический модуль. Этот модуль представляет собой группу операций, обеспечивающих добавление второго слоя поликремния для получения верхних обкладок "интерполикремниевых" (с диэлектриком между поликремниевыми обкладками) конденсаторов и высокоомных резисторов (рис. 3).

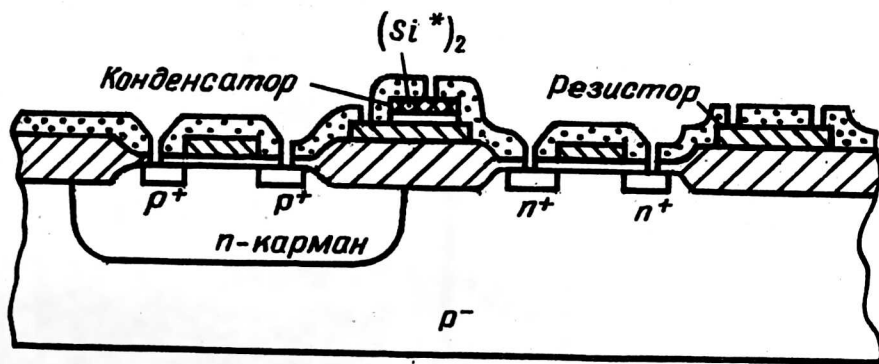


Рис. 3. КМОП-структура аналогового модуля

Основные этапы формирования топологических слоев для реализации аналоговых элементов можно представить по рис. 3.

В первом слое поликремния формируется топологический рисунок затворов транзисторов и нижних обкладок конденсаторов. Далее создается изолирующий слой для диэлектрика конденсаторов (оксидный или двухслойный оксидно-нитридный) и осаждается второй слой поликремния, который легируется ионами донорной примеси с дозой, необходимой для формирования высокоомных резисторов с заданными значениями удельного сопротивления и номиналов. В нем формируется топологический рисунок верхних обкладок конденсаторов и резисторов плазмохимическим травлением. Процесс плазмохимического травления

предусматривает после удаления поликремния с горизонтальных участков структур боковой подтрав под фоторезистивную маску на заданную величину, что исключает наличие поликремниевых "ниток" на рельефе первого слоя поликремния. При этом затворы транзисторов в первом слое поликремния маскируются изолирующим слоем, с которых он селективно стравливается перед удалением фоторезистивной маски.

Далее ионами мышьяка большими дозами легируются, используя фотолитографию, исток-стоковые области транзисторов *p*-типа, верхние обкладки конденсаторов и контактные области резисторов. При этом, кроме активных областей транзисторов *p*-типа, фоторезистом маскируются высокоомные резисторы. При активации донорной примеси с окислением поверхности структур происходит перераспределение примеси по объему резисторов, а окисный слой исключает диффузию фосфора из ФСС при создании межслойной изоляции и изменение в них концентрации донорной примеси.

Эта технология реализации аналогового технологического модуля обеспечивает воспроизводимость параметров аналоговых элементов и возможность изменять толщину затворного окисла, не влияя на параметры конденсаторов, размещенных в двух слоях поликремния.

Введение в состав КМОП-схем с аналого-цифровыми блоками стандартных элементов электрически стираемых программируемых постоянных запоминающих устройств (ЭСППЗУ) открывает новый подход к созданию БИС. Сочетая на одном КМОП-кристалле энергонезависимое и электрически стираемое ППЗУ, логические схемы с настраиваемой конфигурацией и аналоговые функциональные блоки с подгоняемыми элементами, можно получить широкие и гибкие возможности реализации самых разнообразных схем.

В настоящее время ведутся работы по созданию комбинированного технологического процесса изготовления специализированных КМОП БИС со встроенными ЭСППЗУ, включающего разработку технологического модуля памяти и интеграцию его в базовую 2-мкм технологию. Особое внимание уделяется проблемам создания качественных пленок туннельного окисла толщиной 10 нм, обеспечивающего эффективность туннелирования заряда на плавающий затвор и ресурс элементов ЭСППЗУ более 10 000 циклов программирования, и надежной изоляции плавающих затворов.

Дальнейший прогресс в повышении степени интеграции элементов схем и быстродействия, способствующий совершенствованию функциональных способностей КМОП-микропроцессоров, позволяет реализовать на одном кристалле размером до 15x15 мм<sup>2</sup> схемы, которые содержат более 10<sup>6</sup> элементов и имеют быстродействие порядка 100 млн операций в секунду. Для таких схем необходимы элементы с размерами менее 1 мкм.

Традиционная технология изготовления КМОП СБИС сохраняется в основном неизменной вплоть до проектных норм 1,5 мкм, однако для ее дальнейшего продвижения к субмикронным размерам необходимы новые конструкторские и технологические решения. Среди них наиболее эффективны усовершенствованные методы проекционной фотолитографии с масштабом 5:1 и многослойными резистами, гарантирующие высокую разрешающую способность и точность реализации элементов, хорошее перекрытие ступеньки рельефа, и методы плазмохимического и реактивно-ионного травления (РИТ), обеспечивающие анизотропность процесса и высокую селективность. Кроме того, на первый план при столь малых размерах элементов выходят такие паразитные явления, как защелкивание, эффекты горячих носителей и ударной ионизации стока, повышенное сопротивление разводки и деградация мелких диффузионных слоев.

С 1994 г. в НИИЭТ началась разработка пути перехода в область субмикронных размеров элементов, минуя рубеж 1,2 мкм. Разработку базового КМОП-технологического процесса с 1,0-мкм проектными нормами планируется завершить к 1997 г. На его базе станет возможной разработка 32-разрядных цифро-

вых процессоров обработки сигналов и микропроцессоров. Разработка КМОП-схем с 1,2-мкм проектными нормами будет обеспечена путем изменения или упрощения отдельных технологических модулей в рамках базовой технологии на 1 мкм.

В разрабатываемом технологическом маршруте предполагается использовать высококачественные эпитаксиальные структуры типа  $p-p^+-p$ , которые формируются путем создания сильнолегированного слоя ионной имплантацией бора большими дозами на поверхности монокристаллических подложек с низкой плотностью дефектов и выращивания тонких высокоомных эпитаксиальных пленок.

Формирование кармана  $n$ -типа с ретроградным распределением примеси с помощью высокоэнергетической имплантации ионов и самосовмещенного с ним кармана  $p$ -типа, одновременная их разгонка при 1050 °С на глубину 2,0—2,5 мкм позволят значительно уменьшить эффект взаимной боковой диффузии, что существенно для электрической изоляции плотноупакованных КМОП-структур, а в сочетании с тонким эпитаксиальным слоем является одним из основных факторов предотвращения защелкивания. Толщина эпитаксиального слоя при этом ограничивается, главным образом, суммарным температурным отжигом, который определяется относительно низкотемпературной разгонкой ретроградного кармана  $n$ -типа.

Такой КМОП-процесс будет обеспечивать получение одинаковых значений порогового напряжения и удовлетворительных характеристик подпороговой области транзисторов благодаря единственной имплантации ионов бора или дифторида бора в каналные области и оптимизации профилей распределения примесей в самосовмещенных карманах.

Для создания активных и изолирующих областей транзисторов планируется применить метод отдельного формирования этих областей с использованием усовершенствованного LOCOS-процесса и обратного травления полевого окисла.

Эффекты горячих электронов и инжекцию носителей в подложку предполагается устранять путем использования транзисторных структур со слаболегированным стоком. Для этого после формирования топологического рисунка затворов в слое поликремния с вертикальной ступенькой рельефа проводится имплантация донорной примеси для создания слаболегированных областей транзисторов  $n$ -типа, а потом селективная имплантация акцепторной примеси для создания слаболегированных областей транзисторов  $p$ -типа с использованием фотолитографического процесса. Далее осаждается слой окисла, который с помощью анизотропного РИТ удаляется с горизонтальных участков, при этом на боковых участках затворов остаются участки окисла. Потом осуществляется повторная имплантация ионов соответствующего типа примеси в исток-стоковые области с использованием фотолитографического процесса, поскольку при формировании участков окисла на боковых стенках затворов возможно образование нарушенного слоя монокремния и затравливание полевого окисла с оголением неимплантированных областей подложки, приводящих к деградации переходов.

Селективное формирование пленок силицида титана с помощью импульсного отжига, самосовмещенных с исток-стоковыми областями и затвором, позволит уменьшить объемное и контактное сопротивление активных областей и затворов.

Осаждение боросиликатного стекла с подслоем окисла обеспечит надежную межслойную изоляцию и оплавление ее рельефа при низкой температуре, совмещенного со стабилизирующим отжигом силицида титана и активацией примесей в исток-стоковых областях. Использование силицида титана исключает необходимость легирования этих областей с большими дозами и высокотемпературной обработки для отжига радиационных повреждений.

При формировании двухуровневой металлизации в рамках разработанного процесса дополнительно планируется использовать подслой титана-вольфрама. При этом повышается надежность металлизации и межуровневой изоляции,

исключается деградация мелких диффузионных слоев в местах контактов из-за наличия барьерного слоя, препятствующего проникновению алюминия в кремний. Предусматривается также возможность образования в контактных окнах к активным областям слоя нитрида титана и осаждение в межуровневые контакты из газовой фазы вольфрамовых столбиков, обеспечивающих дальнейшее повышение надежности двухуровневой металлизации.

Поперечный разрез проектируемой структуры субмикронных КМОП СБИС показан на рис. 4.

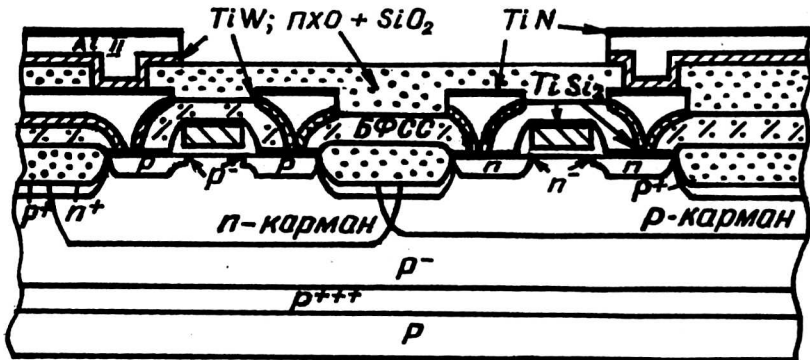


Рис. 4. Структура КМОП с субмикронными размерами

В таблице представлена эволюция параметров и характеристик технологических процессов изготовления КМОП СБИС с разными топологическими нормами.

| Показатели                                    | Проектные нормы, мкм |                |                                 |                                |
|-----------------------------------------------|----------------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------|
|                                               | 3,0                  | 2,0            | 1,5                             | 1,0                            |
| Напряжение пробоя исток-стока транзисторов, В | 15                   | 12             | 12                              | 9                              |
| Затвор (ширина/зазор), мкм                    | 3,0/3,0              | 2,0/2,0        | 1,5/2,0                         | 1,0/1,0                        |
| Металл 1 (ширина/зазор), мкм                  | 4,0/3,0              | 2,5/2,5        | 2,5/2,0                         | 2,0/2,0                        |
| Металл 2 (ширина/зазор), мкм                  | —                    | 4,0/3,5        | 2,5/3,0                         | 2,0/2,0                        |
| Контакты, мкм                                 | 3,0/3,0              | 2,0/2,0        | 1,8/1,8                         | 1,2/1,2                        |
| Напряжение питания, В                         | 5                    | 5              | 5                               | 5                              |
| Тип кармана                                   | p-тип                | n-тип          | Карманы<br>обоих типов          | Карманы<br>обоих типов         |
| Длина затвора, мкм:                           |                      |                |                                 |                                |
| n-МОП                                         | 3,0                  | 2,0            | 1,5                             | 1,0                            |
| p-МОП                                         | 3,5                  | 2,0            | 1,7                             | 1,2                            |
| Структура стока:                              |                      |                |                                 |                                |
| n-МОП                                         | Диффузия<br>As       | Диффузия<br>As | Двойная<br>диффузия<br>(As + P) | Слаболеги-<br>рованный<br>сток |
| p-МОП                                         | Диффузия В           | Диффузия В     | Диффузия В                      | То же                          |
| Толщина затворного окисла, нм                 | 500                  | 400            | 325                             | 225                            |
| Толщина изолирующего окисла, нм               | 850                  | 650            | 650                             | 450                            |
| Глубина переходов, мкм:                       |                      |                |                                 |                                |
| n-тип                                         | 0,45                 | 0,35           | 0,3                             | 0,15                           |
| p-тип                                         | 0,6                  | 0,5            | 0,4                             | 0,25                           |

**БикКМОП-технология.** Комбинированная технология, позволяющая изготавливать биполярные и МДП-транзисторы в одном технологическом цикле, вызывает большой интерес из-за возможности получения новых характеристик

приборов на одном кристалле, синтезируя высокую плотность упаковки, малую динамическую рассеиваемую мощность и логическую гибкость, характерную для КМОП-схем, с высоким быстродействием, малыми логическими перепадами напряжений и высокой чувствительностью к выходным сигналам, свойственным биполярным схемам. Интерес к комбинированным технологиям возрос с развитием специализированных аналого-цифровых БИС, высоковольтных интерфейсных БИС и мощных транзисторов, изготовленных со схемами переключения. В рамках создания БиКМОП-структур НИИЭТ разрабатывает схемы с высокочастотными (670 МГц) биполярными транзисторами и высоковольтными ДМОП-транзисторами на одном кристалле.

Высоковольтная БиКМОП-технология основана на использовании стандартных методов изготовления СБИС. Технологический процесс начинается с создания скрытых *p*- и *r*-слоев, наращивания эпитаксиальных слоев и формирования глубоких диффузионных областей, соединяющих эти слои с поверхностью структур. Затем осуществляются операции по созданию вертикальных ДМОП-транзисторов и КМОП-структур и получение биполярных элементов.

Оригинальность данной технологии заключается в создании на одной эпитаксиальной пленке со скрытыми слоями высоко- и низковольтных структур. В этом случае при использовании толстых низколегированных пленок для получения высоких пробивных напряжений наблюдается потеря частотных параметров биполярных структур. Некоторое время это представляло сложность в достижении требуемых параметров СБИС. Компромисс был найден в результате сочетания скрытых слоев *p*- и *r*-типа, разработки процесса эпитаксиального наращивания и усовершенствования конструкции ДМОП-транзисторов для его лучшей стыковки с биполярными элементами. Конструкцией мощных ДМОП-структур во многом определяется и рассеиваемая мощность прибора. Поэтому потери в насыщенном мощном ДМОП-транзисторе могут быть уменьшены за счет увеличения его размеров. Можно найти компромисс между допустимой рассеиваемой мощностью и площадью, занимаемой под транзистор на кристалле, и избежать в какой-то степени сильной зависимости от конструкции корпуса и материалов теплоотвода.

Основными элементами разработанных приборов являются высоковольтные биполярные *p*-*r*-*p*-структуры, высоковольтные *r*-канальные транзисторы, вертикальные ДМОП-мощные транзисторы. Основной архитектуры вертикальных ДМОП-структур с кремниевыми затворами являются нижний затвор, состоящий из высоколегированного поликремния, и верхний — из металлизации стока. Такой подход позволяет создать прибор с коротким каналом, который получается методом двойной диффузии и определяется величиной бокового ухода примесей разного типа в низколегированную подложку. Примесь вводится в одно окно, что делает процесс самосовмещенным.

Весь технологический процесс предусматривает 15 фотолитографических операций. При этом на одном кристалле могут быть изготовлены вертикальные и горизонтальные высоковольтные ДМОП-транзисторы, высоко- и низковольтные биполярные *p*-*r*-*p*-транзисторы, диоды, диоды Шоттки, стабилитроны, высоко- и низкоомные поликремниевые резисторы и резисторы с *r*-*p*-переходом, а также конденсаторы с использованием слоя окисла или *r*-*p*-перехода.

К настоящему времени разработана по высоковольтной технологии схема импульсного источника питания с мощными ДМОП-транзисторами с максимальным рабочим напряжением до 400 В, а также БИС 3-канального усилителя цветности для видео- и телеаппаратуры с максимальным напряжением 220 В.

Изложенные этапы разработки КМОП-структур в НИИЭТ, большая часть которых была освоена электронной промышленностью, характеризуют общий путь и уровень развития КМОП-технологии в России. Отдельные предприятия используют свои многочисленные разработки и технологические приемы при создании конкретных КМОП-схем.

Важнейшие задачи интегральной микроэлектроники — увеличение степени интеграции и функционального быстродействия схем, сокращение сроков и стоимости их разработки. Одно из направлений их решения — использование базовых матричных кристаллов (БМК) с большой степенью интеграции и автоматизированного проектирования на их основе полузаказных схем с требуемыми функциями и параметрами [7—11]. БМК представляет собой матрицу нескоммутированных компонентов, электрические связи между которыми создаются контактно-металлизированной системой с помощью заказных (переменных) шаблонов. Из матричных компонентов вначале проектируют библиотеку функциональных элементов (БФЭ), имеющих несколько иерархически связанных уровней функционально-схематической сложности (от единиц до десятков тысяч логических вентилях) и обеспечивающих реализацию всех необходимых логических функций. Параметры и топологию БФЭ вносят в банк данных САПР полузаказных схем. Используя САПР и развитую БФЭ, можно на основании одного и того же БМК создавать десятки и сотни полузаказных схем разного назначения и при меньших затратах, чем полностью заказные схемы. Поэтому доля полузаказных схем в общем объеме выпуска изделий микроэлектроники растет, и ведутся интенсивные работы по их совершенствованию. С 1960 г. по настоящее время в России было разработано пять поколений САПР — от трассировки отдельного технологического процесса до создания полностью автоматизированных САД-систем проектирования. С ростом производительности ЭВМ все более актуальным становится переход на многоуровневое проектирование (с вентиляжного на уровень магистральных передач). В настоящее время в МГИЭТ (г. Зеленоград) разработаны программы САПР, позволяющие проектировать сложные СБИС, решая системы до 1 млн. дифференциальных уравнений одновременно (в США могут решать системы порядка 100 тысяч уравнений) [7]. Отметим, что в МГИЭТ разработан ряд БМК с единой САПР и БФЭ, доступной широкому кругу разработчиков ИС и вычислительных устройств.

В заключение раздела можно констатировать, что российская электронная промышленность освоила широкую номенклатуру КМОП-приборов с топологическими нормами до 1,5 мкм и вплотную подошла к рубежу 1,0 мкм.

#### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ МАТЕРИАЛАМИ, ЧИСТЫМИ ПОМЕЩЕНИЯМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ**

Для стабильной работы предприятий микроэлектроники требуется около 14 тыс. материалов, в том числе 3000 особо чистых веществ. Из их числа ~ 180 в России не производится, их поставка обеспечивается по импорту. Важнейшими среди материалов являются кремний, арсенид галлия, стоимость которых составляет большую часть стоимости изделий микроэлектроники. После распада СССР и перехода предприятий, выпускающих полупроводниковый кремний (ППК), под юрисдикцию суверенных государств, сложилась неблагоприятная ситуация с обеспечением исходными комплектующими материалами предприятий электронной промышленности РФ.

Сырьем для всего производства ППК в СССР являлся трихлорсилан (ТХС), монополюбно производимый на Украине Запорожским титано-магниевым комбинатом. Этим же комбинатом производится наиболее высококачественный моносилановый кремний, бестигельные монокристаллы, радиационно-легированный кремний. После прекращения Украиной поставок ТХС на предприятия РФ в 1992 г. было принято решение о создании собственной базы производства ППК в двух регионах: Южно-Уральском и Иркутско-Красноярском.

В первом регионе базовым предприятием выбрано ПО «Маяк» с развитой промышленной инфраструктурой, которое после реконструкции организует производство моносилана и поликремния, выращивание монокристаллов методом бестигельной зонной плавки (БЗП), переработку слитков в полированные пластины. ВНИИ технической физики разрабатывает установки для выращивания моно-

кристаллов диаметром до 150 мм методом БЗП и поточные линии для их переработки в пластины, Завод точного машиностроения (г. Златоуст) осваивает их серийное производство, НИИХиммаш разрабатывает оборудование для производства моносилана, его переработки и очистки, Каменск-Уральский алюминиевый завод — поставщик металлургического кремния повышенной чистоты для моносиланового производства.

Во втором регионе создается комплекс по производству ППК на базе Красноярского горно-химического комбината. Запланировано производство ТХС до 30 000 т/год, ППК по ТХС-технологии — до 1500 т/год и выращивание МКК по методу Чохральского. Строительство и ввод в эксплуатацию осуществляются в три очереди, ввод первой намечено осуществить в 1996 г. [12]. Алюминиевые заводы в гг. Иркутске и Братске обеспечивают поставку металлургического кремния. Бурятское месторождение кварцитов — источник сырья для получения металлургического кремния повышенной чистоты.

Из-за отсутствия должного финансирования реализация планов производства ППК затягивается. Мировой опыт показывает, что в последние годы производство ИС возрастает ежегодно на 20—25%, а ППК только на 10%. Поэтому актуальна разработка новых технологий получения ППК, например, лазерно-стимулированным разложением тетрафторида кремния (разработка ИОФ РАН, Москва), а также совершенствование технологий производства и использования кремниевых пластин, поскольку у пластин диаметром 150—200 мм и первоначальной толщиной 1 см фактически используется только поверхностный слой глубиной в несколько десятков микрон.

Разработка и производство современных СБИС, особенно с субмикронными нормами, требуют почти полного исключения дефектов, привносимых при обработке пластин, что предполагает использование специальных мер по очистке всех сред, с которыми контактирует пластина на маршруте ее обработки.

До 1990 г. практически все чистые помещения предприятий полупроводниковой отрасли промышленности (за редким исключением) соорудили сами предприятия и они не соответствовали в полном объеме даже классу чистоты 100. В 1992 г. была утверждена комплексная программа создания чистых производственных помещений (ЧПП). В рамках этой программы НИИМЭ совместно с рядом предприятий Минатомпрома разработано и организовано промышленное производство элементной базы и технических средств для создания чистых помещений класса 10 со всеми системами обеспечения их деятельности [13]. Помещения такого класса уже введены в действие на заводе «Микрон» и на ряде объектов РФ. Однако стоимость сооружения ЧПП и их эксплуатация в последнее время астрономически возросла. Поэтому весьма привлекательны альтернативные решения — уменьшить ЧПП до минимального необходимого объема, создавая «мини-среды» или вакуумные кассеты, которые обеспечат полную изоляцию пластин от контактов с атмосферой помещения на всех операциях маршрута обработки независимо от условий в помещении.

Применение мини-сред в совокупности со СМДФ-системами обеспечивает поддержание чистоты класса 1 и более высокой вблизи пластины, исключая необходимость строительства ЧПП класса 1. До сих пор жидкостные процессы обработки и очистки пластин играют важную роль. Разработаны различные установки, устройства и технические средства по обработке химреактивов и травителей, обеспечивающих весь цикл — от поступления на предприятие до очистки в точке их использования, а также комплекс приборов для контроля параметров жидких сред. Аналогичное положение с газовыми средами. Возросло использование фторуглеродных материалов и специальных сортов нержавеющей стали. Вводится централизованный контроль всего цикла создания ИС.

**Фотолитография.** Развитие технологии фотолитографии во многом зависит от совершенствования комплекса: степпер — фоторезист — оборудование для нанесения и обработки слоев. При содействии зарубежных партнеров нала-

жено производство степперов на размер 0,8 мкм с полем изображения 16x16 мм. Создается степпер для технологии 0,5 мкм, работающий на i-линии (365 нм). Планируется степпер с Kr — F-эксимерным лазером (248 нм) для ИС с топологическими нормами 0,35 мкм.

Разработано контрольно-измерительное оборудование для измерения неплоскости подложек, дефектности рисунка, линейных размеров, толщины фоторезиста и т. д., а также фоторезист ФП-1 для размера 0,8 мкм и ФП-1А — для 0,5 мкм. Созданы опытные образцы фоторезиста на 0,35 мкм.

*Сухое травление.* Уровень технологии с размером 0,8 мкм могут обеспечить модернизированные установки "Электроника-Т". Дальнейшее развитие процессов сухого травления связано с ужесточением требований по селективности и анизотропии травления, производительности, прецизионности, снижением уровня привносимой дефектности и особенно с проблемой полевого и энергетического воздействия на КМОП-структуру. Для решения этих задач разрабатывается новое поколение реакторов на базе скрещенных Е-Н полей и СВЧ-реакторов.

Одновременно с оборудованием создаются новые сверхчистые (примеси менее  $10^{-7}$ ) материалы для сухого травления:  $\text{Br}_2$ ,  $\text{HBr}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{NF}_2$  и др.

Осваиваются новые технологические процессы формирования слоев активной структуры ИС: эпитаксия с лучистым нагревом, термическое окисление в безводной среде с хлорсодержащим реагентом, ионное легирование электроактивными и неактивными ( $\text{O}_2^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ) примесями, газофазное осаждение слоев поликристаллического или аморфного кремния, газофазных прецизионных по равномерности слоев оксида и нитрида кремния, локально осаждаемого нитрида.

*Ионная имплантация.* Формирование карманов p- и r-типа — одна из основных операций при изготовлении КМОП ИС. Использование высокоэнергетичного имплантера для формирования карманов с ретроградным распределением примеси позволяет получать приборы, устойчивые к эффекту защелкивания с малым расстоянием между стоками-истоками соседних транзисторов. При этом возможно ионное легирование карманов после локального окисления, что дает возможность формировать противоканальные области с более высокой концентрацией.

Разрабатываются процессы формирования "скрытого" диэлектрика путем имплантации ионов кислорода и азота и циклического отжига (НИИМЭ). Технологический процесс создания КМОП ИС в тонком слое кремния (КНИ-технология), изолированном от подложки диэлектриком (оксинитридом), обеспечивает снижение времени задержки, улучшает короткоканальные характеристики полностью обедненного транзистора, повышает его устойчивость к воздействию внешних факторов. Применение истоков и стоков, изготовленных из силицида платины ( $\text{PtSi}$ ) или силицида титана ( $\text{TiSi}$ ), на барьерах Шоттки в таких системах позволяет существенно улучшить характеристики КМОП-приборов. Конечно, говорить о внедрении этих разработок в промышленность еще рано.

## НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ

Одним из ведущих разработчиков перспективной элементной базы и технологии микро- и нанoeлектроники является НИИФП (г. Зеленоград) [14]. Эти разработки обычно передаются в НИИТТ, НИИМЭ, НИИМП, НПО "Микроприбор", где используются при проектировании ИС и технологических процедур. НИИФП проводит отработку технологии изготовления КМОП ИС, физико-технологические исследования новых приборов, создание специализированной аппаратуры на основе КМОП ИС. В Институте имеются лаборатории технологий КМОП ИС и субмикронных КМОП-приборов, отдел аналитических исследований и приборно-технологический САПР. Созданы также базовые матричные кристаллы на основе КМОП ИС с высоким быстродействием (время задержки менее 200 пс), интегральные субмикронные транзисторы с длиной канала менее 200 нм, библиоте-

ка аналоговых и аналого-цифровых элементов с малым потреблением на основе российской промышленной технологии, матричные и линейные фотоприемники на ПЗС, сенсорные элементы на мембранах. Отдел аналитических исследований НИИФП имеет широкий комплект новейшего физико-аналитического оборудования для всесторонних исследований в области топливно-энергетической, нефтяной, газовой и металлургической промышленности. Специалисты отдела имеют большой опыт по отработке новых материалов, технологических процессов, выяснению причин неисправностей, аварий, неудовлетворительного функционирования приборов и машин. Институт располагает уникальным измерительным оборудованием: масс-спектрометр для элементного и изотопного анализа с ионизацией в индуктивно связанной плазме "PLASMAQUAD" (предел измерений меньше ppB для большинства элементов); вторичный ионный масс-спектрометр "CAMECA IMS-4F" (для локального элементного и изотропного анализа сверхмалых количеств примеси в твердых образцах, разрешение 50 нм); растровый оже-микροанализатор PHI-660 (пространственное разрешение до 30 нм, предел обнаружения заданного элемента порядка сотен долей процента); раммановский спектроскоп U-1000 (дает информацию о структуре, кристалличности и фазовом составе образцов); лазерный сканирующий микроскоп LSM-30 (конфокальная оптика и компьютерная обработка изображения позволяют изучать объемную топографию поверхности с латеральным разрешением до 0,5 мкм и практически неограниченной глубиной резкости); растровые электронные микроскопы STEREOSCAN-360 и CAMSCAN-4 (разрешение не хуже 30 Å); просвечивающий электронный микроскоп HITACHI H-800 (разрешение не хуже 2,5 Å) и др.

Приборно-технологический программный комплекс НИИФП проводит расчеты технологических процессов изготовления приборных структур с минимальными размерами до 0,1 мкм, оптимизацию технологического маршрута, определяет глубину р-п-перехода и поверхностное сопротивление, порог МОП-транзистора, емкость и пробивное напряжение перехода, рассчитывает характеристики произвольной приборной КМОП-структуры и многих других. Используемые модели позволяют учитывать и рассчитывать:

каналирование и аморфизацию;

ускорение диффузии при окислении и быстрых термических процессах;

быстрое окисление на основе экспериментально верифицированной модели;

предысторию окисления;

формирование  $TiSi_2$ ;

тепловые поля;

эффекты высокого легирования;

влияние малых размеров.

Приведем ключевые характеристики технологических процессов.

**Импантация** — В, Р, As, Sb,  $BF_2$ , BF, Si в многослойные структуры в диапазоне энергий 1 КэВ — 10 МэВ; наклонная имплантация; учет каналирования; температура подложки от  $-273$  до  $200$  °С.

**Отжиг** — температурный диапазон  $500$ — $1300$  °С; различные режимы; быстрый термический отжиг.

**Окисление** — в атмосфере  $O_2$ ,  $H_2O$ , HCl,  $Cl_2$ , TCF; давление  $10^{-3}$ — $100$  атм; произвольные температурные режимы; быстрое термическое окисление.

**Эпитаксия** — легирование В, Р, As, Sb; температуры  $600$ — $1000$  °С; произвольные температурные режимы.

**Загонка** — легирование В, Р, As, Sb; температуры  $600$ — $1000$  °С; произвольные температурные режимы.

**Нанесение** —  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $Si^*$ , ФСС, Al,  $Al_2O_3$ , резист; температурный диапазон  $20$ — $1300$  °С.

**Травление** — селективное и неселективное, изотропное и анизотропное.

**Литография** — формирование окон в маске (определяет набор сечений для моделирования профилей в приборной структуре).

В качестве примеров приведем несколько новых разработок элементной базы НИИФП.

**Интегральные схемы с однослойной топологией** [15]. Переход к технологии с одной операцией литографии позволяет минимизировать помехи и все последующие технологические операции проводить в замкнутом контролируемом объеме. Заложен принцип кодирования основных элементов ИС (активных приборов и элементов межсоединений) элементами плоских прямоугольных графов. В результате достигаются максимальная стабилизация технологии, воспроизводимость предельно минимальных размеров, минимизация привносимых дефектов. Пример однослойной топологии двухвходового вентиля представлен на рис. 5. Свойства: однократный перенос топологического рисунка на пластину с маской, сохранение рисунка на маске в течение всего технологического маршрута, возможность переноса рисунка со схемы на пластину непосредственно, возможность перехода к схемам с воздушной (вакуумной) изоляцией.

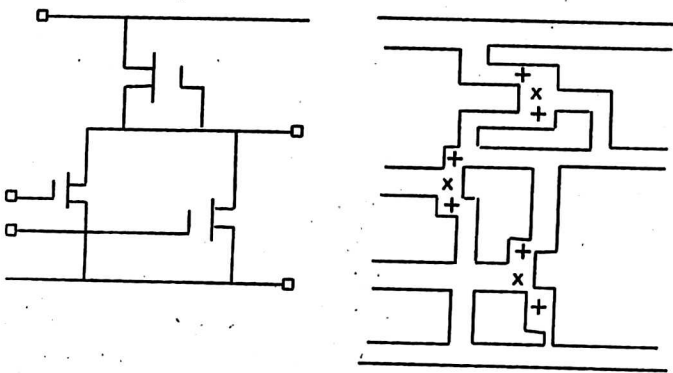


Рис. 5. Двухвходовый вентиль однослойной топологии

### Вертикальный МОП-транзистор — логический элемент СБИС.

Вертикальный МОП-транзистор с верхним антизапорным контактом и источниками электронов и дырок в основании может использоваться в качестве простейшего логического вентиля-инвертора, а аналогичные элементы с двумя затворами реализуют функциональную полную систему логических элементов.

Конструкция вертикального МОП-транзистора позволяет совмещать в одной структуре транзисторы с каналами различного типа проводимости. Это повышает плотность размещения логических элементов, которая зависит от регулярности соединений между ними. Для связи близлежащих элементов может быть использована электростатическая связь. Конструкция вентиля на вертикальном МОП-транзисторе представлена на рис. 6. Использование таких транзисторов сверхбольших МОП ИС на элементах с суб- и наномикронными размерами дает предельную плотность вентиляей, топологическую поразрядную совместимость ЗУ

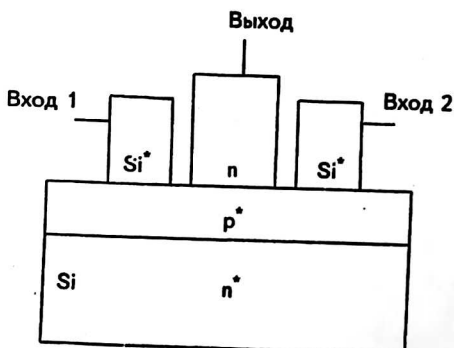


Рис. 6. Вентиль на вертикальном МОП-транзисторе

и процессоров, открывает возможность электростатической связи между элементами. Площадь логического вентиля — один топологический квадрат; минимально допустимый размер 0,01 мкм; степень интеграции ИС — более  $10^{10}$ ; напряжение питания 0,4—0,8 В. Область применения — массово-параллельные процессоры, нейро- и нанокomпьютеры.

**Полевые транзисторы с туннельными контактами.** Контакт металл — туннельный диэлектрик-полупроводник (МТДП) является перспективной структурой при переходе в нанометровый диапазон топологических размеров. Он обладает инжекционными свойствами, зависящими от соотношения работы выхода металла и полупроводника, которое сохраняется в широком диапазоне условий работы. Использование МТДП-контактов в качестве стоков истоков МОП-транзисторов позволяет упростить конструкции последних и сохранить им работоспособность при нанометровых размерах. Пример конструкции МТДП-транзистора представлен на рис. 7. Транзистор формируется на однородной полупроводниковой подложке или пленке по низкотемпературной технологии, работает в суб- и нанометровом диапазоне при криогенных температурах. Возможно использование органических диэлектриков. Толщина туннельного диэлектрика 1—2 нм, минимально допустимый топологический размер 10—20 нм. Возможные области применения — микросистемы, нанoeлектроника, молекулярная электроника.

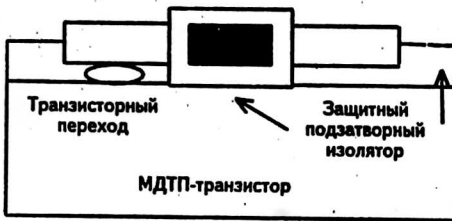


Рис. 7. МДТП-транзистор

Разработанный в НИИФП КМОП БМК представляет собой нескоммутированную КМОП вентильную матрицу, содержащую стандартно расположенный на кристалле набор элементов, соединяемых между собой с помощью двух переменных слоев металлической коммутации. Предназначен для ускоренного создания специализированных заказных СБИС высокого быстродействия.

**П а р а м е т р ы:**

время задержки (приведено в таблице);

| Функция/нагрузка           | Задержка, нс |          |
|----------------------------|--------------|----------|
|                            | T = 300 К    | T = 77 К |
| Инвертор/1 вх              | 0,37         | 0,22     |
| Инвертор/3 вх              | 0,95         | 0,52     |
| Инвертор/3 вх + 1 мм связи | 1,3          | 0,65     |
| 2 ИЛИ—НЕ/2 вх              | 1,37         | 0,68     |
| (2 И—НЕ)—НЕ/2 вх           | 0,97         | 0,52     |
| (3 ИЛИ—НЕ)—НЕ/3 вх         | 2,1          | 1,1      |
| (3 И—НЕ)—НЕ/3 вх           | 1,85         | 0,87     |

потребляемая мощность внутреннего инвертора при нагрузке:

1 вх — 2,2 мкВт/МГц;

2 вх + 1 мм связи — 7,5 мкВт/МГц;

напряжение выходного буфера при токе 4 мА высокого уровня 4,3 В, низкого уровня 0,42 В;

время задержки выходного буфера при  $C_n = 10$  пФ равно 1,60 нс (300 К) и 0,92 нс (77 К);

общее количество вентилях 1,5x10<sup>4</sup>;

число элементов ввода-вывода 132.

Библиотека элементов содержит 68 наименований.

В состав набора аналоговых и аналого-цифровых элементов входят:

1. 8-разрядный АЦП со встроенной выборкой-хранением: напряжение питания ИС 3,5—10,0 В; ток потребления 200 мкА; тактовая частота 1,0 МГц; время преобразования 10 мкс; параллельный выходной код; нелинейность не более 0,5 ЕМР.

2. Операционный усилитель (ОУ) общего применения ( $F_1 = 1$  МГц,  $I_n = 1$  мА): напряжение питания ИС 5—10 В; ток потребления не более 2 мА; коэффициент усиления ОУ с разомкнутой обратной связью не менее 10 000; сопротивление нагрузки не менее 20 кОм; коэффициент ослабления синфазного сигнала 60 дБ.

3. ОУ быстродействующий ( $F_1 = 20$  МГц; коэффициент усиления более 2000).

4. ОУ микромощный ( $F_1 = 50$  кГц,  $I_n = 10$  мкА; коэффициент усиления не менее 10 000).

5. Измерительный усилитель, содержащий ОУ с периодической корреляцией и встроенные цепи обратной связи.

6. Компаратор быстродействующий ( $t < 10$  нс).

7. Аналоговый ключ с управлением (время переключения не более 10 нс).

8. Стабилизированный источник питания.

В работе [16] обоснована перспективность использования десорбции, стимулированной электронными возбуждениями (ДСЭВ), для субмикронной литографии. Представлены экспериментальные результаты по созданию на поверхности кремниевых пластин узора из металлического палладия с субмикронными размерами путем облучения дихлорида палладия остросфокусированным электронным или ионным пучком с низким энергетическим порогом. Из-за малой энергии электронов и ионов радиационные эффекты не возникают. В процессе не используется резист, поэтому существенно сокращается число операций литографии. Разработанные электронно-оптические системы, фокусирующие электронный луч с энергией 1 кэВ до 200 нм, в сочетании с литографическим процессом на основе ДСЭВ могут позволить выйти на принципиально новый уровень в развитии субмикронной и нанотехнологии.

НИИФП разрабатывает кремниевую субмикронную технологию на основе кластерного оборудования, способы глубокой очистки и стабилизации поверхности, прецизионную субмикронную литографию, сухие газофазные методы УФ-литографии, рентгенорезисты и рентгеношаблоны, а также методы и средства экспресс-анализа чистоты технологических средств на наличие микрочастиц, биологических, органических и ионных примесей, лазерной дефектоскопии поверхности полупроводниковых пластин и т. п.

Не последнее место в НИИФП занимают разработки однокристалльных систем на ПЗС для различных областей науки и техники [17]. Они начались еще в 1971 г. и охватывают фоточувствительные ПЗС видимого диапазона, инфракрасного и ИС на ПЗС для хранения и обработки информации. Разработаны матричные ПЗС для цифровых и телевизионных систем, на них же были изготовлены измерители линейных размеров на фотошаблонах и полупроводниковых пластинах, устройства считывания капиллярных линий непосредственно с пальца человека. На основе линейного ПЗС из 2716 фоточувствительных элементов был создан считыватель штриховых кодов. Разработанные линейные фоточувствительные микросхемы БЛ-2716 и Л-2048 представляют собой функционально законченные изделия для применения в различных фотоприемных устройствах [18]. Наличие встроенных схем обрамления позволяет минимизировать затраты на разработку новых устройств на их основе. Разработан ряд устройств с электрической и электрооптической перезаписью информации, отличающихся высокой надежностью хранения информации. Весьма успешным оказалось применение ПЗС для задержки аналоговых сигналов. Был разработан ПЗС ЛЗ для многосистемного

блока цветности карманного телевизора [19]. Кристалл ПЗС АЗ имеет две линии задержки, и все схемы электронного обрамления. Устройства ПЗС оказались весьма подходящими для тестирования кремниевой МДП-технологии (благодаря высокой чувствительности ПЗС к различного рода дефектам кристаллической структуры полупроводника и границы раздела полупроводник — диэлектрик). Тестовые ПЗС-структуры позволяют контролировать многие параметры ИС в процессе изготовления (термоток неосновных носителей, зависимость ее от температуры, напряжения на полевом электроде, рельеф границы раздела полупроводник — диэлектрик, места пробоя и многое другое). Тестовые ПЗС-структуры использовались для контроля технологии ДОЗУ [20].

АО "Ангстрем" разрабатывает и выпускает КМОП-изделия широкой номенклатуры, включая тонкопленочные КНС структуры, радиационно стойкие ЗУ, быстродействующие АЦП, микропроцессоры и микроконтроллеры. Отметим интересную разработку семейства КМОП БМК серии "Ряд" [21], куда вошли четыре кристалла объемом до 22 000 вентилях. Рабочие тактовые частоты до 50 МГц, большая библиотека элементов. Полный цикл проектирования-изготовления полужаказных БИС на основе этих БМК составляет 2—3 мес.

В НИИЭМ разработан и налажен на заводе "Микрон" промышленный выпуск современных интегральных микросхем, включающих схемы стандартной логики, постоянные ЗУ, линейные микросхемы и интерфейсы, оперативные статические ЗУ, постоянные программируемые ЗУ и программируемые логические матрицы [22].

Разработан микропроцессорный комплект из 12 КМОП КНС микросхем на алюминиевом полиамидном носителе, позволяющий создавать быстродействующие бортовые ЭВМ произвольной разрядности, стойкие к специальным внешним воздействиям [23]. Комплект выпускается на микросхемах серии Б1825, организовано серийное производство.

Разработана также серия быстродействующих КМОП КНС-микросхем для комплектации радиоэлектронной аппаратуры [24], использующей аналого-цифровое, цифроаналоговое преобразование, измерение временных интервалов между электрическими импульсами, счет импульсов. Серия включает следующие микросхемы:

1523ХП1 — ИС измерителя временных интервалов для лазерных дальномеров с точностью до 5 м и дальностью до 20 км;

1523ХП2 — ИС измерителя временных интервалов широкого профиля с выводом измеряемой информации в двоичном и двоично-десятичном коде, счетчик импульсов на частоты до 75 МГц;

Б582 — ИС измерителя временных интервалов с возможностью накопления результатов измерений;

Б605 (Б606) — параллельный АЦП разрядности 8 бит, частота преобразования 15 МГц, потребляемая мощность до 250 (300) мВт;

Б618 — ЦАП на 10 бит, время установления выходного сигнала для 8 (10)-разрядного преобразования 50 (100) нс, потребляемая мощность не более 150 мВт. ЦАП имеет два токовых выхода для работы на внешнюю нагрузку 75 Ом.

Отметим разработки НИИ "Пульсар" (Москва) фоточувствительных ПЗС ИС для датчиков направления и скорости движения изображения в телевизионных системах дистанционного измерения и контроля [25]. Число светочувствительных элементов 512x128, спектральный диапазон 450—1050 нм. Датчики предназначены для автоматизации и контроля технологических процессов, в том числе в агрессивных и вредных средах бесконтактного измерения и контроля углов и угловых перемещений движущихся объектов (лент, потоков, проката, вращающихся цилиндров, стрелок и т. д.).

В НИИ "Пульсар" разработан новый способ получения многослойных кремниевых структур для силовой электроники и микроэлектроники на основе пря-

мого соединения кремниевых пластин с получением монокристаллической многослойной структуры [26]. Технология позволяет получать структуры типа КНИ (например,  $\text{Si} - \text{SiO}_2 - \text{Si}$ ) с толщиной рабочего кремниевого слоя до 5—6 мкм высокого качества.

Метод непосредственного сращивания пластин превращает известный метод диэлектрической изоляции в общедоступную серийную технологию. По-видимому, сращенные пластины и технологические процессы изготовления ИС, адаптированные для таких подложек, в ближайшем будущем займут важное место в производстве аналоговых, смешанных и мощных высоковольтных ИС с высокими техническими характеристиками.

Технологию сращивания пластин можно рассматривать как одну из разновидностей КНИ-технологии, роль которой будет возрастать по мере уменьшения эффективной длины канала транзисторов при продвижении в субмикронную область (0,4 мкм и менее).

На заводе "Анстрем" создана и отлажена установка "Вертикаль-1" [27, 28] для селективного вакуумно-плазменного травления свободными радикалами поликремниевых слоев МДП СБИС. Установка представляет собой малогабаритный модуль-полуавтомат индивидуальной обработки подложек, технические характеристики которой превосходят характеристики лучших отечественных и мировых аналогов.

Разработана [29] магниточувствительная КМОП ИС с пороговым выходом, в которой сенсор и схема обработки сигнала размещены на одном кристалле, для бесконтактных переключающих устройств, датчиков положения. Область применения — автомобильная и приборостроительная промышленность.

В Институте микроэлектроники РАН (г. Ярославль) разрабатываются новые технологические процессы создания интегральных микросхем с субмикронными топологическими нормами. Новая технология нанесения фоторезиста сухим методом с помощью плазменной полимеризации предложена в работе [30]. Фоточувствительный слой (ФЧС) резиста формируется совместным осаждением его полимерной основы и ФЧ-компонента в зоне послесвечения ВЧ-разряда. Объединение плазменной полимеризации (ПП) с одновременным осаждением нафтохинондиазида (НХДА) на подложку ( $\text{Si}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Me}$  и др.) позволяет сформировать ФЧС сухим способом с приемлемыми скоростями роста (0,02 мкм/мин) и необходимого состава, включающего ПП-стирол, ПП-акриловую кислоту и НХДА. В работе [31] исследован механизм увеличения (в несколько раз) скорости травления кремния во фторуглеродной плазме в присутствии на его поверхности маски из серебра или меди. Локальность каталитического действия металла маски зависит от потенциала поверхности и ее бомбардировки потоками ионов и электронов. Процессы травления фоторезиста, кремния, окиси кремния, сплава титана — вольфрама в галогеносодержащих плазмах ВЧ-разряда пониженного давления исследованы в работе [32]. Показана возможность оптимизации параметров плазмы и внешних газов для получения приемлемых скоростей и селективности травления с хорошей однородностью на пластинах большого диаметра с минимальными радиационными повреждениями и загрязнениями поверхности. Выбору оптимального технологического маршрута процесса реактивного ионно-плазменного травления титана и силицида титана посвящена работа [33]. Предложена новая технология выращивания КНИ-структур микроэлектроники с использованием в качестве изолирующего слоя фианита [34]. Использование фианита  $\text{YSZ}$  ( $0,89\text{ZnO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$ ) может существенно уменьшить стоимость КНИ-структур. Экспериментально структуры  $\text{Si}/\text{YSZ}/\text{Si}$  получены путем последовательного напыления пленок фианита и кремния на подложку  $\text{Si}$  методом магнетронного ВЧ-распыления. Оптимизация режимов напыления позволила сформировать КНИ-структуры с высокой степенью упорядочения и необходимыми электрофизическими параметрами. Пробойное напряжение высокотекстурированных пленок  $\text{YSZ}$  в КНИ-структуре составило 90 В при толщине 0,2 мкм.

Удельное сопротивление напыленной Si-пленки (толщиной 0,6 мкм) составило 0,2 Ом/см<sup>2</sup>, сопротивление поликристаллической пленки Si той же толщины на три порядка выше.

Конечно, в кратком обзоре нет возможности ознакомить читателя со всеми КМОП-изделиями, выпускаемыми российской электронной промышленностью. Заинтересованный читатель может восполнить этот пробел, ознакомившись со справочником [35], который содержит сведения о 40 тыс. ИС, транзисторах, электровакуумных приборах, конденсаторах, резисторах, установочных и коммутационных изделиях с указанием предприятий-изготовителей.

### Заключение

КМОП-технология СБИС позволяет производить аппаратуру высокой сложности, области применения которой постоянно расширяются. Это оправдывает концентрацию усилий на дальнейшее развитие КМОП-техники. Для создания некоторых специальных изделий целесообразно применять БиКМОП-технологии, хотя стоимость изделий при этом возрастает на 30—50%.

КМОП-технология еще не исчерпала своих потенциальных возможностей, и могут быть реализованы приборы на ее основе с большими плотностью упаковки и быстродействием. До фундаментальных ограничений, определяющих предельные возможности КМОП-схем, еще достаточно далеко.

### Литература

1. Электронная промышленность: Справочник предприятий и организаций отрасли/АСУ "Импульс", 1993.
2. Электронная пром-сть, 1994, № 4—6. С. 3.
3. То же. Спец. вып. С. 3.
4. Грибов В. Г. Всерос. науч.-техн. конф. "Электроника и информатика". — г. Зеленоград, 1995.
5. Андреев А. С.// Электронная пром-сть, 1994. Спец. вып. С. 16.
6. Сонов Г. В. и др.// Там же. 1994. № 4—5. С. 19.
7. Казеннов Г. Г. Всерос. науч.-техн. конф. "Электроника и информатика". — г. Зеленоград, 1995.
8. Гритченко В. Н. Итоги науки и техники/ ВИНТИ, 1986. Т. 18. С. 3.
9. Пономарев М. Ф. и др. БМК и программируемые логические матрицы. — М.: Высш. шк., 1987.
10. Файзулаев Б. Н. и др. Быстродействующие матричные БИС и СБИС. — М.: Радио и связь, 1989.
11. Электронная пром-сть, 1993. № 1—2.
12. Инвестиции в России, 1994. № 1. С. 28.
13. Дягилев В. Н. и др.// Электронная пром-сть, 1994. № 4. С. 5.
14. Борисов Б. С. и др.// Там же, № 7—8. С. 8.
15. Ракитин В. В.// Микроэлектроника, 1995. № 6. С. 415.
16. Борисов Б. С. и др. Стимулированная десорбция в пучках электронов и ионов для субмикронной литографии// Прикладная физика, 1996. № 1. С. 72.
17. Тишин Ю. И. и др.// Электронная пром-сть, 1994. № 7—8. С. 69.
18. Сафонов А. Г. и др.// Там же. С. 75.
19. Кузьмин С. В. и др.// Там же, 1993. № 6—7. С. 27.
20. Тишин Ю. И.// Микроэлектроника, 1991. Т. 20. Вып. 5. С. 440.
21. Электронная пром-сть, 1995. № 3. С. 69.
22. Там же, № 6. С. 37.
23. Науч.-техн. достижения (кр. описания)/ ВИМИ, 1995. № 2. С. 2.
24. Там же. С. 5.
25. Лицензии, патенты, ноу-хау, 1993. С. 10.
26. Там же. С. 28.
27. Ванин А. А. и др.// Науч.-техн. достижения/ ВИМИ, 1995. № 1. С. 27.
28. Ванин А. А.// Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1990. Вып. 2.
29. Галущкин А. И. и др.// Науч.-техн. достижения/ ВИМИ, 1995, № 2. С. 9.
30. Буяновская П. Г. и др.// Матер. симпозиума ISTARC'95. — г. Иваново, 1995. С. 238.
31. Амиров И. И. Там же. С. 67.
32. Амиров И. И. и др. Там же. С. 396.
33. Абрамов А. В. и др. Там же. С. 133.
34. Бочкарев В. Ф. и др. Там же. С. 244.
35. Справочник. Перечень изделий электронной техники, рекомендованных к поставке в 1996 г./ ЦНИИ "Электроника", 1995.

**MICROELECTRONICS CMOS**  
**(The analitical review of investigations in Russia)**

***I. S. Baikov***

The All-Russia Research Institute of Interbranch Information, Moscow, Russia

***A. I. Baikov***

Moscow State University of Communication, Moscow, Russia

*The review contains brief information about the main scientific and industrial electron centers in Russia, engaged in the development and production of CMOS integrated circuits. Main physical and technological principles of its construction and modern directions of fundamental and applied works are submitted, including area of supercompact high-speed submicron VLSI for military and multimedia applications.. The problems of material and equipment well-being of microelectronics are discussed. Associated reference information on the nomenclature of industrial-type CMOS chips and new advanced VLSI Systems are presented.*