



М И Р электроники

А.С. Адонин,
К.О. Петросянц

КМОП интегральные схемы
со структурой
«кремний на сапфире»

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2022

Монография подготовлена в результате проведения исследования (проект № 15-01-0165) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) и с использованием средств субсидии на государственную поддержку ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, выделенной НИУ ВШЭ.

УДК 621.382:681.142.6

ББК 32.852.3

A28

Рецензент:

Горнев Е. С. – заместитель руководителя приоритетного технологического направления по электронным технологиям, АО «НИИ молекулярной электроники» (НИИМЭ). Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН (2019), лауреат Государственной премии СССР и премии Правительства РФ в области науки и техники (дважды).

A28 Адонин А.С., Петросянц К.О.

**КМОП интегральные схемы со структурой «кремний на сапфире»
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2022. – 380 с. ISBN 978-5-94836-614-2**

Книга посвящена КМОП интегральным схемам (ИС) со структурой «кремний на сапфире», которые являются стратегически важным направлением создания ИС для экстремальных и ответственных применений и одновременно быстроразвивающимся перспективным направлением создания больших ИС (БИС) и систем на кристалле (СнК) для мобильных систем связи. В книге рассмотрены следующие вопросы: специфика интегральных схем со структурой КМОП КНС; требования к исходным материалам и КНС-структурам; базовые технологические процессы изготовления приборов и схем; типовые конструкции элементов КМОП КНС интегральных схем различных поколений, их электрические характеристики и параметры; методы приборно-технологического и схемотехнического моделирования приборных структур и типовых цифровых и аналоговых схемных фрагментов; основные характеристики и параметры радиационно стойких КМОП КНС-микросхем и БИС отечественных и зарубежных производителей; элементная база оптоэлектронных ИС, в том числе негальванические фотоэлектрические модули для автономного электропитания и модули для многоканальных оптических соединений.

Книга предназначена для инженеров и специалистов, занимающихся разработкой и применением ИС и БИС, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

Табл. 66, рис. 192, библи. 195 назв.

УДК 621.382:681.142.6

ББК 32.852.3

© Адонин А.С., Петросянц К.О., 2022

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2022

ISBN 978-5-94836-614-2

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
Литература.	21
Глава 1. Гетерозепитаксиальные структуры «кремний на сапфире».	24
1.1. Физико-химические характеристики гетерозепитаксиальных структур «кремний на сапфире»	24
1.2. Основные параметры КНС-структур для радиационно стойких КМОП-схем	34
1.3. Методы исследования параметров глубоких уровней в структурах КНС	40
1.4. Результаты исследования глубоких уровней в структурах КНС, подвергнутых различным видам внешних воздействий	47
Литература.	61
Глава 2. Технология создания радиационно стойких КМОП БИС со структурой «кремний на сапфире»	64
2.1. Разработка и исследование технологических процессов формирования радиационно стойких МОП-структур	64
2.2. Базовый технологический маршрут изготовления КМОП БИС КНС SOS-2 (длина канала до 4 мкм).	80
2.3. Технологический маршрут изготовления КМОП БИС SOS-3 (длина канала 2 мкм).	85
Литература.	92
Глава 3. Технология КМОП БИС КНС с коротким каналом	93
3.1. Короткоканальные эффекты в КМОП КНС-транзисторах	94
3.2. Поиск путей совершенствования технологического маршрута с помощью методов математического моделирования.	104
3.3. Технологический маршрут изготовления КМОП БИС КНС (SOS-4) с длиной канала до 1,5—1,25 мкм	110
3.4. Двухкарманная технология с самосовмещенными затворами на ультратонком кремнии с длиной канала 0,5 мкм и менее (UTSi-технология компании <i>Peregrine</i>).	120
Литература.	129



Глава 4. Элементы радиационно стойких КМОП КНС БИС . . .	132
4.1. МОП КНС-транзисторы, КМОП-ячейки	133
4.2. Стабилитрон, изготовленный по технологии КНС	145
4.3. Пассивные RC-цепочки	153
4.4. Сенсоры на основе ионоселективных МОП КНС-транзисторов.	155
4.5. Индуктивность.	160
4.6. Ячейка ПЗУ с электрически стираемой перепрограммируемой информацией (EEPROM).	162
Литература	163
Глава 5. Подсистема моделирования элементной базы радиационно стойких КМОП БИС КНС.	165
5.1. Пятиуровневая методика моделирования радиационно стойких КМОП КНС БИС.	166
5.2. Методика оценки чувствительности исходных КНС-структур к высокотемпературным обработкам и радиационным воздействиям	167
5.3. Приборно-технологическое моделирование с помощью пакета Synopsys TCAD	172
5.4. Схемотехнические модели МОП-транзисторов на изолирующей подложке, учитывающие влияние радиационных эффектов.	194
5.5. Моделирование КМОП КНС БИС с использованием библиотек стандартных ячеек и функциональных схемных блоков	228
Литература	236
Глава 6. Отечественные радиационно стойкие интегральные схемы со структурой «кремний на сапфире»	239
6.1. Радиационно стойкие КМОП БИС предприятия ПАО НПП «Сапфир»	241
6.1.1. Самосовмещенная технология SOS-2 на структурах КНС.	241
6.1.2. Радиационно стойкий КМОП КНС базовый матричный кристалл	246
6.1.3. Радиационно стойкие КМОП БИС, изготовленные по самосовмещенной технологии со «спейсерами» (SOS-3).	257

6.1.4. Радиационно стойкие КМОП БИС КНС, изготовленные по двухкарманной технологии с использованием высокоомного кремния (SOS-4) . . .	261
6.2. Радиационно стойкие КМОП КНС-микросхемы предприятия ПАО «Ангстрем»	265
6.3. Радиационно стойкие КМОП КНС-микросхемы предприятия ФГУП РФЯЦ — ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седатова»	267
6.4. Радиационно стойкие аналоговые КМОП КНС-микросхемы предприятия АО «НПО измерительной техники»	275
Литература	277
Глава 7. Зарубежные радиационно стойкие интегральные схемы со структурой «кремний на сапфире»	281
7.1. КМОП КНС-микросхемы компании <i>Peregrine Semiconductor Corporation</i>	283
7.1.1. UltraCMOS-технология компании <i>Peregrine</i>	283
7.1.2. Серийные микросхемы компании <i>Peregrine Semiconductor</i>	285
7.2. КМОП КНС-микросхемы компании <i>Dynex Semiconductor</i>	291
7.3. КМОП КНС-микросхемы компании <i>Intersil Corporation</i>	293
7.4. КМОП КНС-микросхемы компании <i>GEC Pleassey (Mitel Semiconductor)</i>	300
Литература	301
Глава 8. Оптоэлектронные БИС со структурой КНС	302
8.1. Элементы фоточувствительных ИС на КНС-структурах	304
8.1.1. Фотодиоды	306
8.1.2. Фототранзистор	315
8.2. Схемотехнические модели фотодиода и фототранзистора	317
8.2.1. Обобщенная SPICE-модель фотодиода	318
8.2.2. Модель фототранзистора	322
8.3. Фоточувствительные ИС на активных пикселях	323
8.3.1. Активный пиксельный сенсор	324
8.3.2. Структура и принцип работы фоточувствительных ИС на АПС	326
8.3.3. Активный пиксель на основе биполярного транзистора с горизонтальной структурой	328



8.3.4. Фоточувствительные ИС ультрафиолетового диапазона	332
8.4. Фотоприемные интегральные схемы со встроенным фотовольтаическим питанием	339
8.4.1. Структура и принцип работы фотоприемных ИС со встроенным фотовольтаическим питанием	339
8.4.2. Фотоэлектрический преобразователь	344
8.4.3. Описание чипа оптоэлектронной микросхемы	346
8.5. Высоковольтные маломощные фотоэнергетические модули	348
8.6. Диодный оптрон на основе GaN/GaAs-излучателя и КНС-фотоприемника	350
8.7. Оптоэлектронные модули на сапфировых подложках для многоканальных оптических соединений	355
8.7.1. FOCUTS-модули для параллельных оптических межсоединений	357
8.7.2. Оптоэлектронные модули для двумерных оптических соединений	358
Литература	364
Заключение	367
Литература	378

ВВЕДЕНИЕ

Создание и освоение в производстве стратегически важной для России радиоэлектронной аппаратуры для ядерной энергетики, аэрокосмической техники, радиолокации, связи и телекоммуникаций, систем вооружения и военной техники, оборудования для ликвидации последствий радиационных и других экологических катастроф, утилизации ядерных и химически агрессивных отходов, а также для специальной аппаратуры гражданского назначения невозможно без создания и промышленного освоения высокоэффективной и высоконадежной микроэлектронной элементной базы. Основу этой элементной базы составляют специализированные большие интегральные схемы (БИС) и системы на кристалле (СнК). При создании БИС и СнК гражданского и военного назначения имеет место устойчивая тенденция возрастания сложности устройств за счет интеграции на одном кристалле функций приема и передачи сигналов радио- и СВЧ-диапазонов, цифровой обработки, промежуточного хранения и накопления информации, внутреннего контроля, диагностики, управления и других функций. Причем эта тенденция особенно заметно усилилась в последние годы в связи с бурным развитием средств беспроводной мобильной связи и телекоммуникаций. Помимо высокой функциональной гибкости (т.е. способности одновременно в одной конструкции реализовывать цифровые, аналоговые, сенсорные и др. функции) специализированные БИС и СнК должны обладать высокой производительностью и быстродействием, умеренным потреблением энергии, приемлемыми массогабаритными показателями, а также высокой надежностью и устойчивостью к воздействию внешних факторов, в первую очередь температуры и радиации [1–3].

В настоящее время сформировались три основных направления в разработке и промышленном производстве таких схем: на основе технологии арсенида галлия, кремний-германиевой БиКМОП-технологии и КМОП-технологии «кремний на диэлектрике».

Арсенид-галлиевые (GaAs) интегральные схемы традиционно используются в специальной радиоэлектронной аппаратуре СВЧ-

диапазона вследствие их высокого быстродействия и стойкости к воздействию радиации и температуры [4, 5]. Однако по стоимости они в 3—7 раз дороже схем на основе кремния, потребляют гораздо большую мощность и уступают кремниевым микросхемам в части удобства и качества реализации на одном кристалле цифровых функций и пассивных компонентов.

Технология кремний-германиевых БиКМОП БИС интегрирует на одном кристалле аналоговые устройства на гетеропереходных биполярных транзисторах (ГБТ), обладающих очень высоким быстродействием, с цифровыми функциями КМОП-транзисторов и пассивными R-, L-, C-элементами. В плане быстродействия, реализации аналого-цифровых функций и отчасти радиационной стойкости они являются в определенной степени альтернативой схемам на основе GaAs, но при этом обладают гораздо меньшей стоимостью из-за практически полной совместимости с традиционной кремниевой КМОП-технологией [6—8]. Однако ГБТ, хотя и имеют очень высокое быстродействие, но потребляют достаточно большую мощность по сравнению с КМОП-элементами. Кроме того, ни одна из разновидностей SiGe БиКМОП-технологии не может интегрировать на кристалле пассивные элементы так же эффективно, как технология, использующая полностью изолирующую (диэлектрическую) подложку.

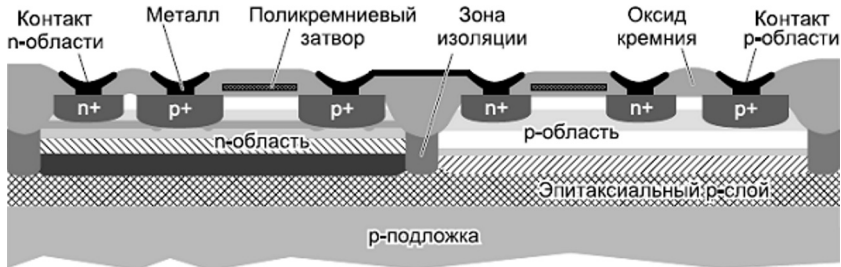
Интерес к использованию тонких пленок кремния на изолирующей подложке возник практически одновременно с развитием МОП-технологии, поскольку появилась возможность реализовать технологический маршрут создания КМОП БИС близкий к «идеальному».

На рис. 1 приведены схематические изображения разрезов КМОП-элементов, изготовленных на объемном кремнии (верхний рисунок) и на изолирующей сапфировой подложке (нижний рисунок).

Диэлектрическая подложка обладает целым рядом важных преимуществ перед подложкой на объемном кремнии. Она позволяет:

- увеличить плотность размещения элементов;
- практически исключить токи утечки;
- исключить тиристорный эффект;
- резко снизить паразитные емкости;
- повысить быстродействие;

КМОП-транзисторы, изготовленные по технологии на объемном кремнии



КМОП-транзисторы, изготовленные по технологии на ультратонком кремнии

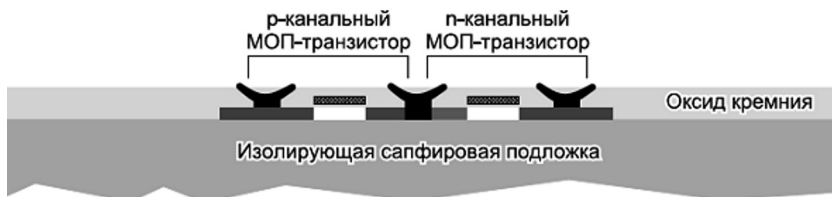


Рис. 1. Структура кристалла КМОП-элемента, изготовленного по объемной и КНС-технологии на ультратонких слоях кремния

- повысить радиационную и температурную стойкость микросхем;
- повысить помехоустойчивость и надежность.

Кроме того, важным преимуществом технологии изготовления КМОП БИС на диэлектрической подложке является ее практически полная совместимость с технологией КМОП БИС на объемном кремнии и, как следствие, возможность использования одной технологической линии для обоих процессов.

В настоящее время отработаны и промышленно освоены две разновидности технологии КМОП на диэлектрике: КНИ — кремний на изоляторе (оксиде кремния SiO_2) и КНС — кремний на сапфире (Al_2O_3).

Технология КМОП на КНИ-подложках является сегодня, наряду с технологией КМОП на объемном кремнии, базовой про-

мышленной технологией изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС) с субмикронными и глубоко субмикронными топологическими размерами КМОП-элементов. Этой технологией владеют ведущие зарубежные компании — производители СБИС: *Intel, IBM, AMD, STMicroelectronics, TSMC, NEC* и др., а также ведущие отечественные предприятия, освоившие массовый выпуск схем микропроцессоров, памяти, цифровой логики, для которых основными параметрами являются высокая степень интеграции элементов на кристалле, высокое быстродействие и производительность, малое потребление мощности. Благодаря стремительному прогрессу в области полупроводниковых субмикронных технологий сегодня промышленно изготавливаются КМОП КНИ СБИС с минимальными размерами элементов 65—25 нм.

Важным преимуществом КМОП КНИ СБИС перед аналогичными СБИС на объемном кремнии является их более высокая радиационная стойкость к воздействию одиночных ядерных частиц (ОЯЧ), что чрезвычайно важно при их использовании в аэрокосмической и другой специальной технике.

Физика, технология, характеристики элементов и микросхемотехника КМОП КНИ СБИС в достаточной степени исследованы; им посвящено большое количество публикаций в специализированных журналах и целый ряд серьезных монографий [9—13].

Технология структур «кремний на сапфире» (КНС) была впервые предложена в 1960 году компанией *Rockwell* исключительно в целях создания материала, обеспечивающего высокое быстродействие и малую мощность потребления ИС на основе комплементарных структур металл — окисел — полупроводник (КМОП) [14]. Практически одновременно эта технология начала создаваться и у нас в стране [15].

Благодаря изолирующим свойствам КНС-подложки возможна интеграция КМОП-транзисторов и высокодобротных пассивных элементов (емкостей и индуктивностей). В частности, индуктивности, сформированные с использованием металлических покрытий на КНС и имеющие добротность $Q = 50$, функционируют на частоте до 5 ГГц, в то время как добротность индуктивностей, сформированных по КМОП-технологии на объемном кремнии, составляет 10. Это позволяет создавать с использованием КНС-технологии высококачественные настраиваемые элементы и резонансные контуры.

В случае ВЧ цифро-аналоговых применений приборы на основе КНС обеспечивают большую величину максимальной частоты $f_{\max}$ по сравнению с f_T (предельная частота усиления по току). В приборах на основе объемного кремния $f_{\max}$ примерно равна f_T , в то время как в ИС на основе КНС $f_{\max}$ примерно втрое выше, чем f_T . Это обеспечивает большую гибкость конструирования ИС с учетом имеющихся технологических возможностей. Оценки показывают, что технология КМОП КНС с разрешением 0,5 мкм способна обеспечить достижение $f_{\max} = 50$ ГГц, что превышает аналогичный параметр для приборов, получаемых по КМОП-технологии на объемном кремнии с разрешением 0,13 мкм.

И, наконец, следует отметить высокую устойчивость ИС на основе КМОП КНС к воздействию дестабилизирующих факторов, что делает возможным их использование в наиболее неблагоприятных условиях.

Тем не менее большие потенциальные возможности, заложенные в конструкции и технологии КМОП БИС на КНС, до недавнего времени не были реализованы в массовом производстве из-за трудностей с изготовлением высококачественных исходных КНС-структур. Высокая стоимость исходных КНС-структур (на мировом рынке — до 1,5 долл./см²) и, следовательно, более высокая цена КМОП БИС КНС определили в дальнейшем преимущественно специальные применения этой технологии в аэрокосмической и военной технике.

О высокой надежности компонентов на основе структур КНС свидетельствуют следующие факты. Самым далеко находящимся в настоящее время от планеты Земля рукотворным объектом является космический аппарат «Вояджер-1» (Voyager-1) [16], на котором работает бортовой компьютер на базе микропроцессора, выполненного по КНС-технологии фирмы RCA. Космический аппарат «Вояджер-1» стартовал 05.09.1977 года и покинул нашу Солнечную систему в 2003 г. В 2006 г. он находился на расстоянии в 14 миллиардов километров от Земли. Несмотря на более чем 40-летнее пребывание в космосе, спутник продолжает функционировать по настоящее время [17]. Современное поколение микроэлектронных компонентов со структурой КНС используется в бортовой электронной аппаратуре космических аппаратов, создаваемых в рамках крупных международных космических программ, таких как *Globalstar*, *ExoMars*, *Glonass*, *Gallileo* и др.

В начале 2000-х годов компания *Peregrine Semiconductor Corp.* (США) совместно с фирмой *Asahi Kasei Microsystems Corp.* (Япония) разработала усовершенствованную версию КНС технологии на ультратонком кремнии — Ultra Thin Silicon — UTSi. В очень тонком кремниевом эпитаксиальном слое (до 0,1 мкм) кристаллические дефекты сведены практически к минимуму, что позволило создавать качественные КМОП КНС СБИС с высокими объемами выпуска и низкой ценой [20, 21], по качеству практически не уступающие объемному кремнию.

Достижения фирмы *Peregrine* резко изменили отношение к КНС-технологии. За короткое время она стала технологией массового производства и вышла на передовые позиции на мировом коммерческом рынке, сохранив при этом свои позиции в области радиационно стойких схем для аэрокосмической и военной промышленности.

Решить проблемы по разработке устойчиво воспроизводимых параметров элементной базы БИС КМОП КНС под силу только ведущим фирмам — изготовителям микроэлектронных изделий. Поэтому в 2010 г. *Peregrine* совместно с компанией *IBM* — мировым лидером в области микроэлектроники и вычислительной техники приступила к созданию коммерческой UltraCMOS-технологии СБИС на 200-мм КНС-пластинах, которую запланировано последовательно реализовать в несколько этапов. На настоящий момент реализованы СБИС с проектными топологическими нормами 250 нм. В ближайшем будущем ожидается создание микросхем с минимальными топологическими размерами 180, 130 и 90 нм [22, 23]. Процесс совершенствования технологической платформы (STeP — Semiconductor Technology Platform) фирмы *Peregrine* по годам представлен на рис. 2. Видно, что ключевой параметр, характеризующий собственную задержку переключения МОП-транзисторов, — постоянная времени $R_{on} C_{off}$ по мере уменьшения топологических проектных норм в среднем уменьшается на 23% в год [24]. Так, в 2017 г. с использованием технологического процесса UltraCMOS-12 был достигнут рекордно низкий по величине показатель $R_{on} C_{off}$, равный 80 фемтосекундам.

Результатом реализации этой программы является создание нового поколения аналого-цифровых СБИС и систем на кристалле для применения не только в аэрокосмической и воен-

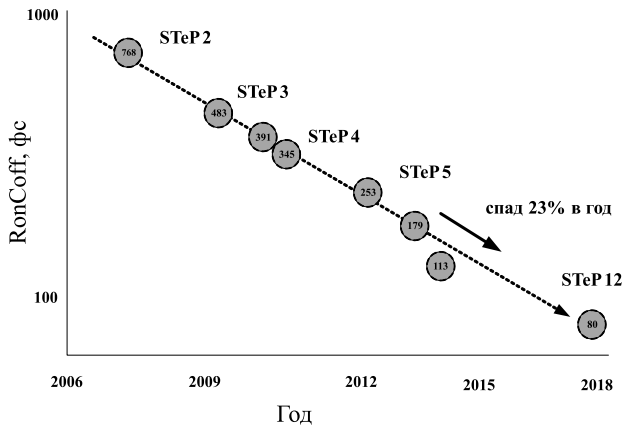


Рис. 2. Совершенствование технологической платформы фирмы *Peregrine* по годам

ной технике [25], но и в других важных областях — беспроводной связи и телекоммуникациях, мобильной телефонии, цифровом телевидении, спутниковых системах, промышленной и автомобильной электронике и целом ряде других применений [26–28].

В 2019 г. компания *PSemi Corp.* (панее *Peregrine Semiconductor*) объявила об освоении технологии UltraCMOS-13, использующей 300-мм КНС-пластины для изготовления радиочастотных ИС и БИС.

В вышеперечисленных устройствах в полной мере проявляется ряд важных преимуществ полностью диэлектрической (сапфировой) подложки. Преимущества КНС-структур перед КНИ-структурами вытекают из наличия так называемого эффекта полупроводниковой (Si) подложки, присущего КНИ-структурам. В КНИ-структурах промежуточный слой изолятора SiO_2 отделяет верхний активный слой, в котором расположены МОП-транзисторы, от кремниевой подложки, которая является основой конструкции и располагается снизу. Такая конструкция, во-первых, заметно ограничивает уровень защиты от электростатического заряда (ESD) и, как следствие, верхний предел рабочих напряжений. Во-вторых, через кремниевую подложку возникают паразитные

электрические связи между элементами, токи утечки и т.д., что ограничивает верхний предел рабочих частот. В-третьих, теплопроводность изоляционного слоя SiO_2 в КНИ-структурах ($\lambda_{\text{SiO}_2} = 0,2\text{—}1,4$ Вт/(м·град)) на два порядка меньше, чем у кремния ($\lambda_{\text{Si}} = 84\text{—}126$ Вт/(м·град)), что затрудняет отвод тепла из внутренних областей активных приборов и способствует их нагреву. Известно, что эффект «саморазогрева» ограничивает рабочие мощности и частоты КМОП КНИ-приборов и негативно сказывается на их надежности. В КНС-структурах эта проблема ощущается гораздо слабее, поскольку разница в значениях коэффициента теплопроводности сапфира ($\lambda_{\text{Sph}} = 46$ Вт/(м·град)) и кремния (см. выше) не столь существенна.

Кроме того, на структурах КНС, по сравнению со структурами КНИ, удается изготавливать активные элементы с более высокой линейностью характеристик и усилением, а также пассивные элементы (резисторы, емкости, индуктивности) с очень высокой добротностью, что чрезвычайно важно при создании высококачественных радиочастотных и СВЧ-микросхем. Испытания и практика эксплуатации аппаратуры показывают, что приборы на КНИ уступают приборам на КНС не только по предельным частотам усиления f_T и f_{max} , но и по показателям температурной и радиационной стойкости и надежности.

Для любых технологий, и в первую очередь для технологий массового производства, очень важное значение имеют факторы, обеспечивающие снижение стоимости. Большим преимуществом UltraCMOS перед другими технологиями является то, что микросхемы изготавливаются на тех же самых фабриках, на которых используются обычные кремниевые пластины. Однако благодаря преимуществам полностью диэлектрической (сапфировой) подложки один и тот же уровень функциональных параметров микросхем достигается на менее продвинутом, а следовательно, и менее дорогом оборудовании и технологическом процессе. Например, 0,25-мкм технология КНС обеспечивает такой же уровень электрических параметров КМОП-микросхем, как 0,13-мкм технология объемного кремния. Снижение издержек от использования технологии не самого последнего и передового уровня огромно. Экономия складывается не только за счет того, что удастся избежать использования более дорогого технологического оборудования и амортизационных затрат, связанных с более поздней и совершен-



ной, но менее освоенной технологией производства, но и за счет существенно более низких затрат на проведение самих технологических процессов.

Благодаря тому, что в рамках UTSi-технологии достигается почти идеальная интеграция на сапфировой подложке пассивных (резисторов, конденсаторов, индуктивностей) и активных элементов, открываются отличные перспективы для создания суперсовременных БИС на КНС для сбора и обработки данных, а также схем радиочастотного и СВЧ-диапазона. За разработку UTSi-технологии в 2011 г. Марк Бургенер (Mark Burgener) и Рональд Риди (Ronald Reedy), основатели компании *Peregrine Semiconductor*, получили премию международной некоммерческой ассоциации IEEE, которая присуждается за вклад в развитие технологий. Основатели компании считают, что КНС — наиболее успешная разновидность технологии КНИ, предназначенная для совершенствования рабочих характеристик и интеграции в радиочастотных устройствах. Спрос на эту технологию возрастает с 1990-х гг., когда появились коммерческие беспроводные сети. О скорости роста можно судить по следующим показателям: в 2016 г. совокупный объем коммерческих изделий, изготовленных по технологии UltraCMOS, составил более 700 млн шт., а в конце 2019 г. количество поставленных на рынок радиочастотных ИС превысило 5 млрд шт. Стоимость сапфировых подложек также быстро снижается благодаря огромному спросу на светодиоды белого свечения, где потребление этих подложек составляет десятки миллионов штук, и это дает дополнительные преимущества КНС-технологии. UltraCMOS-технология оказалась более мощной, чем поначалу казалось. По мере появления в сотовых телефонах цифровых устройств беспроводной связи параметр «линейность» стал весьма востребованным. Благодаря этому UTSi-технология вышла на передовые позиции на рынке сотовой телефонии (на рынке самой жесткой конкурентной борьбы).

Благодаря оптической прозрачности сапфировой подложки оптоэлектронные чипы на основе КНС также являются перспективной элементной базой для создания оптоэлектронных модулей.

Таким образом, решение научно-технических задач создания и внедрения КНС-технологии и организации производства высоконадежных БИС на ее основе является актуальной проблемой.

Принципиально, что элементная база важнейших радиоэлектронных систем, имеющих оборонное значение, может создаваться отечественной промышленностью.

Поэтому российскими учеными и специалистами поставлена и решена задача создания отечественной КНС-технологии, которая позволяет реализовать отмеченные выше возможности и обеспечить потребности страны в БИС КНС военного и специального назначения, не прибегая к услугам зарубежных производителей.

У нас в стране технология КМОП КНС интегральных схем была разработана и промышленно освоена в 70-х годах прошлого столетия [15]. Исследования шли практически параллельно с разработками зарубежных компаний *RCA*, *Harris*, *GEC-Plessey*.

В течение более чем 40 лет КНС-технология обеспечивала и сегодня продолжает обеспечивать потребности страны в радиационно стойких микросхемах аэрокосмического и военного назначения, что позволяет не прибегать к услугам зарубежных производителей и решать задачи импортозамещения в таких важных областях, как безопасность и обороноспособность страны. В частности, функциональнополный микропроцессорный комплект микросхем, изготавливаемых по отечественной КМОП КНС-технологии, многие годы используется в бортовых вычислительных системах управления баллистических ракет стратегического назначения, составляющих основу оборонительного щита Российской Федерации [18, 19].

Что касается гражданских применений, то БИС и СнК на КНС-подложках, изготовленные по UltraCMOS-технологии, являются перспективной элементной базой для отечественных систем мобильной связи и телекоммуникаций, поскольку обеспечивают высокое быстродействие, высокую добротность и линейность характеристик, малый уровень собственных шумов в сочетании с высокой надежностью и помехоустойчивостью при эксплуатации в реальных условиях космического пространства.

Значительный вклад в развитие и становление отечественной КМОП КНС-технологии внесли работы Адонина А.С., Александрова П.А., Кабальнова Ю.А., Романова А.А., Чумака В.Д., Яромского Я.П., Яшанина И.Б. и др.

Элементная база и схемотехника КМОП КНС развивались благодаря работам Деревянкина В.М., Машевича П.Р., Новожилова Е.А., Поварницыной З.М., Полякова И.В., Сенникова И.А., Черного А.И., Яненко А.В. и др.

Большой вклад в область системотехники и аппаратного использования КМОП КНС ИС и БИС внесли Антимиров В.М., Синегубко Л.А., Сметанов А.Ю., Трапезников М.Б., Усов Н.Н. и др.

Очевидно, что успешная реализация возможностей технологии КМОП КНС немыслима без широкого применения методов и средств моделирования и автоматизации проектирования, учитывающих специфику этого вида микросхем как на элементном, так и на схемотехническом уровнях. В этой части необходимо отметить работы Петросянца К.О., Сухоносенко В.Г., Улановой А.В., Харитоновой И.А., Кокина С.А. и др.

К сожалению, у нас в стране и за рубежом КНС-технология по количеству научно-технических публикаций и по степени освещения в других информационных источниках значительно уступает КНИ-технологии. Материал по текущим разработкам приборов и схем на основе КНС представлен в немногочисленных журнальных статьях и трудах профильных конференций. Из имеющихся крупных работ, посвященных КНС-технологии, следует в первую очередь отметить обзоры [29, 30], монографии [15, 19, 31, 32] и диссертацию Адонина А.С. [33].

Работа [29] представляет собой обзор методов создания ультратонких слоев КНС без детального их рассмотрения. Монография [31] посвящена физическим, химическим, механическим и электрическим свойствам сапфира как материала электронной техники. В монографии [15] описаны первые отечественные результаты, полученные в середине 1970-х годов, по созданию эпитаксиальных КНС-структур и МОП-транзисторов на их основе. В более поздней монографии 2006 года [19] приведена архитектура, электрические и др. характеристики отечественных цифровых и аналого-цифровых БИС, изготовленных по КМОП КНС-технологии. Современные КМОП КНС-приборы и интегральные схемы, изготовленные на базе UTSi-технологии, наиболее полно на сегодняшний день представлены в зарубежной монографии [32], изданной в 2010 году.

Приходится, к сожалению, констатировать, что российские книги и публикации не освещают в должной степени современное состояние работ в области технологии, элементной базы и схемотехники КМОП КНС. Зарубежные монографии и обзоры труднодоступны российским специалистам и не отражают ряд важных

вопросов. Журнальные публикации и труды конференций носят, как правило, узконаправленный характер.

Очевидно, что область применения КМОП КНС интегральных схем будет неуклонно расширяться. Кроме того, возможно появление новых типов БИС и СнК со структурой КНС.

В связи с вышеизложенным возникла потребность обобщить имеющиеся в этой области научно-технические сведения и разработки. В этом состоит главная задача настоящей книги.

Книга базируется на опыте отечественных и зарубежных специалистов в области создания технологии и элементной базы КНС КМОП ИС/БИС.

Она написана на основании материалов, опубликованных в отечественной и зарубежной печати, кроме того, она в значительной степени базируется на теоретических и практических результатах авторов, в течении многих лет работающих в этой области.

В книге рассмотрены следующие вопросы: специфика интегральных схем со структурой КМОП КНС; требования к исходным материалам и КНС-структурам; базовые технологические процессы изготовления приборов и схем; типовые конструкции элементов КМОП КНС интегральных схем различных поколений, их электрические характеристики и параметры; методы приборно-технологического и схемотехнического моделирования приборных структур и типовых цифровых и аналоговых схемных фрагментов; основные характеристики и параметры радиационно стойких КМОП КНС-микросхем и БИС отечественных и зарубежных производителей; элементная база и особенности оптоэлектронных ИС.

На всех уровнях изложения — от выбора исходного материала до контроля и тестирования выходных параметров и характеристик изготовленных микросхем, особое внимание в книге уделяется такому важному для этого класса микросхем показателю, как радиационная стойкость.

В главе 1 рассмотрены особенности создания гетероэпитаксиальных структур кремния на сапфире, приведены параметры, характеризующие качество границы раздела сапфир — полупроводник, описаны результаты исследования глубоких уровней в структурах КНС методом термостимулированного разряда конденсатора (ТРК).

В главе 2 описана промышленная технология создания радиационно стойких КМОП КНС интегральных схем первых поколе-

ний, маршрут SOS-2 с длиной канала МОП-транзисторов 4—3 мкм и маршрут SOS-3 с длиной канала 2 мкм. Подробно рассмотрены основные технологические операции эпитаксии кремниевых слоев n- и p-типа, термического окисления, микроциклы формирования активной МОП- или МНОП-структуры, областей стока и истока. Приведены экспериментальные результаты для зарядов в оксиде и на границе раздела Si—SiO₂, результаты измерения ВАХ МОП-транзисторов, токов утечки, пороговых напряжений и напряжений пробоя МОП-структуры и p-n-переходов.

В главе 3 описана промышленная технология изготовления радиационно стойких КМОП КНС ИС с коротким каналом. Рассмотрены короткоканальные эффекты в МОП КНС-транзисторах и особенности их влияния на основные параметры: пороговое напряжение, ток утечки, подвижность, кинк-эффект и др. Приведен технологический маршрут изготовления КМОП КНС ИС (SOS-4) с раздельным легированием карманов n- и p-канальных транзисторов с длиной канала 1,5—1,25 мкм. Показано, что ограничения технологии SOS-4 связаны с большой толщиной гетероэпитаксиального слоя кремния.

В рамках технологии SOS-4 при уменьшении толщины поликремниевых слоев рассмотрены приемы шунтирования поликремниевых затворов тугоплавкими металлами (вольфрамом) или их силицидами (силицидом титана).

Рассмотрена наиболее совершенная в настоящее время технология создания КМОП КНС БИС на ультратонких слоях кремния (~0,1 мкм) с длиной канала 0,5 мкм и менее — UTSi-технология фирмы *Peregrine*. Показаны основные отличия UTSi-технологии от двухкарманной технологии SOS-4.

Глава 4 посвящена элементам ИС и БИС, которые реализуются в рамках промышленной КНС-технологии. Рассмотрены структуры и электрические характеристики (ВАХ и ВФХ), а также параметры следующих элементов: n- и p-канальных МОП-транзисторов и КМОП-ячеек; стабилитронов; пассивных RC-цепочек и сенсоров со структурой МОП, изготовленных по различным вариантам отечественной КНС-технологии SOS-2, SOS-3, SOS-4, а также индуктивностей и ячеек EEPROM, изготовленных в рамках UTSi-технологии.

В главе 5 рассмотрена подсистема моделирования элементов радиационно стойких КМОП КНС ИС и БИС. Описана 5-уровне-

вая методика моделирования, которая включает в себя следующие этапы:

- 1) выбор исходных КНС-структур в наименьшей степени чувствительных к высокотемпературным обработкам и радиационным воздействиям;
- 2) приборно-технологическое моделирование физической структуры прибора с помощью пакета Synopsys TCAD;
- 3) разработка схмотехнических SPICE-моделей МОП КНС-транзисторов, учитывающих радиационное воздействие;
- 4) разработка макромоделей типовых аналоговых и цифровых ячеек и фрагментов ИС с учетом радиационных воздействий, анализ их радиационной стойкости;
- 5) SPICE-моделирование функционально законченных ИС и БИС с учетом радиационных воздействий, анализ их радиационной стойкости.

В главе 6 приведены описания и основные параметры радиационно стойких КМОП КНС ИС и БИС, выпускаемых отечественными производителями: АО НПП «Сапфир», ПАО «Ангстрем», ФГУП ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова, АО «НПО ИТ».

В главе 7 приведены основные параметры КМОП КНС и БИС, выпускаемых зарубежными фирмами: *Peregrine Semiconductor Corp.* (США), *Dynex Semiconductor* (США), *Intersil Corp.* (бывшая *HARRIS*) (США), *GEC PLESSY Semiconductor* (Великобритания) и др. для гражданских, военных и космических применений.

Глава 8 посвящена оптоэлектронным ИС и БИС, а также микромощным высоковольтным фотоэнергетическим модулям для автономного питания электронных устройств и FOCUTS-модулям для параллельных оптических межсоединений. Описана структура и основные характеристики базового элемента — фотодиода с увеличенной *i*-базой и управляющим затвором. Приведен ряд схмотехнических решений для отдельных фрагментов оптоэлектронных ИС и фотовольтаических преобразователей. В отличие от материалов, приведенных для фоточувствительных ИС со структурой КНС в известной зарубежной монографии Е. Culurciello [32], в главе рассмотрено новое направление развития оптоэлектронных ИС на КНС-структурах со встроенным фотовольтаическим источником питания, базирующееся исключительно на оригинальных отечественных разработках.



Авторы благодарны И.И. Романовой за большую работу по подготовке рукописи книги.

Монография подготовлена в результате проведения исследования (№ проекта 15-01-0165) в рамках программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) и с использованием субсидии на государственную поддержку ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, выделенной НИУ ВШЭ.

Литература

1. Яненко А.В., Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Чумаков А.И. Экстремальная электроника. — М.: НИЯУ МИФИ, 2014, 244 с.
2. Белоус А.И. Космическая электроника. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014, 900 с.
3. Extreme Invironment Electronics / Edited by J.D. Cressler, H.A. Mantooth CRC Press. Taylor and Francis, 2013.
4. Айнспрук Н., Уиссмен У. Арсенид галлия в микроэлектронике. — М.: Мир, 1998, 560 с.
5. Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Ломако В.М. Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия. — Минск: изд. Университетское, 1992, 219 с.
6. Cressler J.D. Silicon Heterostructure Hand-book: Materials, Fabrication, Devices, Circuits, and Applications of SiGe and Si-Strained Layer Epitaxy. Taylor and Francis Group, 2006.
7. Тимошенков В.П. Кремниевые гетероструктуры и проектирование СВЧ интегральных схем на их основе // В кн.: Нанотехнологии в электронике. Вып. 2. — М.: Техносфера, 2013, с. 601—686. — (Сер. Мир электроники).
8. Петросянц К.О., Самбурский Л.М., Харитонов И.А. Влияние различных видов радиации на характеристики кремний-германиевых гетеропереходных транзисторов // Электронная техника. Сер. 2. «Полупроводниковые приборы», 2014, вып. 1, с. 3—18.
9. Суворов А.Л., Богданович Б.Ю., Залужный А.Г. и др. Технологии структур КНИ. — М.: МИЭТ / МИФИ / ФГУП ГНЦ ИТЭФ, 2004.
10. Coulinge J.-P. Silicon-on-Insulator. Kluwer Academia Publishers, London, 2004.
11. Marshall A., Natarjan S. SOI Design: Analog, Memory and Digital Techniques. Kluwer Academia Publishers, London, 2002.

12. Bernstein K., Rohrer N.J. SOI Circuit Design Concepts. Springer, 2002.
13. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. Книга 2. — М.: Техносфера, 2015, с. 707—768.
14. Rapp U.K., Ross E.C. Silicon on Sapphire Substrates Overcome MOS Limitations // Electronics, Sept., 1972, № 25, pp. 113.
15. Папков В.С., Цыбульников М.Б. Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе. — М.: Энергия, 1979.
16. Smith B.A. et al. The Jupiter system through the eyes of Voyager 1 // Science. 1979, vol. 204, № 4396, pp. 951—972.
17. Bisschoff D., Potgieter M. New local interstellar spectra for protons, helium and carbon derived from PAMELA and Voyager 1 observations // Astrophysics and Space Science. 2016, vol. 301, № 2, pp. 1—8.
18. Новожилов Е.А., Самров И.А., Сенников И.А. и др. Функционально полный микропроцессорный комплект радиационно-стойких БИС КМОП КНС серии Б1825 // Научно-технические достижения. Сер. «Приборостроение и радиоэлектроника». 1994, № 5, с. 19—23.
19. Микроэлектроника бортовых вычислительных комплексов / Под ред. А.Ю. Сметанова. — М.: Логос, 2006. — 190 с.
20. Ultra CMOS Process compared to Bulk Silicon CMOS, http://www.psemi.com/content/utracmos/ultracmos_SOS_VS_bulk.html.
21. Адонин А.С. Новые возможности технологии БИС со структурой «кремний на сапфире» // Электронные компоненты, 2000, № 3, с. 45—49.
22. Peregrine and IBM co-develop 180 nm RF CMOS, http://www.semiconductor-today.com/news_items/2010/MAY/PEREGRINE_130510.htm.
23. Peregrine Semiconductor and IBM see the future of RF in sapphire, http://www.edn.com/blog/Practical_Chip_Design/35782.
24. Peregrine Takes Another “STeP” Forward in Silicon-on-Sapphire Technology, <http://electronicdesign.com/communications/peregrine-takes-another-step-forward-silicon-sapphire-technology>.
25. Robinette D. Ultra CMOS RFICs Ease the Complexity of Satellite Designs // Microwave Journal, Aug. 2009, pp. 86—98.
26. CMOS on sapphire Technology Delivers New Level of multi-GHz RF Integration, <http://www.psemi.com>.
27. McCarthy J. Silicon on Sapphire has a unique ability to integrate the elements of a wireless system on a chip Solution. Peregrine Semicon. Corp., 2010, Advantage Business Media, <http://www.psemi.com>.
28. Kelly D. Cover Story Integrating CMOS Designs in GSM Front Ends. Peregrine Semicon. Corp., 2011 Advantage Business Media, <http://www.psemi.com>.
29. Кривулин Н.О. Ультратонкие слои кремния на сапфире. — Нижегородский ГУ, 2011.

30. Кернс Ш.Э., Шейфер Б.Д. Разработка радиационно-стойких ИС космического назначения: обзор подходов // ТИИЭР, 1988, т. 76, № 11, с. 75—146.
31. Dobrovinskaya E., Lytvinov L., Pishchik V. Sapphire: Material, Manufacturing, Applications. Springer, 2009.
32. Culurciello E. Silicon-on-Sapphire Circuits and Systems. McCrawHill, 2010.
33. Адонин А.С. Технология и элементная база радиационно-стойких КМОП БИС со структурой «кремний на сапфире» / Докторская диссертация. — МИЭМ, 2003, 287 с.

ГЛАВА I

ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ «КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ»

1.1. Физико-химические характеристики гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире»

Расширение областей применения КМОП БИС КНС, используемых в настоящее время для создания аэрокосмической и специальной аппаратуры, связано прежде всего с совершенствованием и развитием базового процесса изготовления КМОП БИС КНС, который включает большой объем работ по созданию исходных структур кремния на сапфире, а также выращиванию монокристаллов сапфира и изготовлению подложек, удовлетворяющих требованиям гетероэпитаксии кремния.

Помимо кремниевой технологии, сапфировые подложки применяются также в качестве основы при эпитаксиальном наращивании полупроводниковых пленок широкозонных проводников GaN, AlGaN и др.

На сегодняшний день имеется широкий спектр информации о сапфире и областях его применения. Технологические особенности выращивания монокристаллов сапфира и исследования его характеристик достаточно подробно отражены в работах [1–3]. При разработке структур КНС и электронных компонентов по технологии КМОП БИС КНС разработчикам и технологам важна и интересна информация о состоянии границы раздела $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—Si}$, критериях оценки ее качества, а также путях уменьшения влияния переходного слоя на границе раздела $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—Si}$ на качество электрически активного слоя кремния. Основные характеристики и свойства сапфира указаны на сайте производителя подложек [4].

При изготовлении и подготовке сапфировых подложек для гетероэпитаксии кремния можно выделить два этапа.

На первом этапе обеспечиваются кристаллографические, геометрические параметры, а также требования по чистоте обработки и другие (табл. 1.1, 1.2).

Таблица 1.1. Характеристики сапфира

1.1. Общие	
Химическая формула	Al_2O_3
Метод выращивания	Киропулос
Структура	Гексагональная с элементами ромбоэдрической $a = b = 4,77 \text{ \AA}$ $c = 13,04 \text{ \AA}$
1.2. Тепловые	
Температура плавления	2050 °C
Коэффициент линейного расширения	$6,7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (параллельно оси C) $5,0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (перпендикулярно оси C)
Теплопроводность	46,06 Вт/м·град (0 °C)
Коэффициент линейного термического расширения	$5,3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (параллельно оси C) $4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (перпендикулярно оси C)
Коэффициент теплопроводности	0,1 кал/см·с °C (25 °C)
Удельная теплоемкость	0,18 кал/г·с °C (25 °C) менее 0,02
Излучательная способность	$\lambda = 2,6 \text{ до } 3,7 \text{ мкм}$ (880 °C)
1.3. Физические	
Параметры решетки	$a = 4,763 \text{ \AA}$ $c = 13,003 \text{ \AA}$
Плотность	3,98 г/см ³
1.4. Механические	
Твердость по Моосу	9
Твердость по Виккерсу	HV = 2300 МПа
Твердость по Кнупу	1800 дН/мм ² (параллельно оси C) 2200 дН/мм ² (перпендикулярно оси C)
Прочность при растяжении	230 кгс/мм ²

Таблица 1.1. (Окончание)

1.4. Механические (продолжение)	
Прочность при сжатии	300 кгс/мм ²
Прочность на изгиб	35 до 39 дН/мм ²
Напряжение при сжатии	2,0 ГПа
Модуль Юнга	$4,8 \times 10^6$ кгс/мм ²
Предел прочности при изгибе	7000 кгс/мм ²
Предел прочности на разрыв	400 МПа/мм ² (25 °С) 275 МПа/мм ² (500 °С) 345 МПа/мм ² (1000 °С)
Точка плавления	2053 °С
Модуль упругости Юнга	$3,6 \times 10^4$ до $4,4 \times 10^4$ дН/мм ²
1.5. Оптические	
Коэффициент преломления	$n_o = 1,768$ $n_c = 1,760$
1.6. Электрические	
Диэлектрическая проницаемость	9,3 (10^3 — 10^9 Гц, 25 °С, перпендикулярно оси С) 11,5 (10^3 — 10^9 Гц, 25 °С, параллельно оси С)
Удельное сопротивление	10^{16} Ом·см (25 °С) 10^{11} Ом·см (500 °С) 10^6 Ом·см (1000 °С)
Электрическая прочность	480 000 В/см
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,000030 (плоскость С, 10^{10} Гц) 0,000086 (плоскость А, 10^{10} Гц)

Таблица 1.2.

Свойства сапфира	Преимущества
Устойчив к высоким температурам	Плавится при температуре около 2050 °С Сохраняет чистоту в высокотемпературных средах
Твердый и прочный	Устойчив к царапанью большинством материалов Устойчив к высокому давлению Износоустойчив

Таблица 1.2. (Окончание)

Свойства сапфира	Преимущества
Химически инертен, нерастворим в большинстве обычных промышленных растворов и устойчив к коррозии	Может использоваться в агрессивных средах Легко отмывается Имеет длительный срок службы Имеет высокую чистоту В некоторых средах срок службы сапфира в 5 раз больше срока службы кварца
Широкий спектр пропускания в УФ, видимом ИК- и СВЧ-диапазонах	Длительное и надежное пропускание инфракрасных лучей Прекрасное светопропускание при 0,25—4,50 мкм
Высокая удельная теплопроводность	Обеспечивает способность к быстрому нагреванию и охлаждению

Фирмы — изготовители сапфировых подложек часто владеют и технологией изготовления гетероэпитаксиальных структур кремния, т.к. экономически выгодно предлагать на рынке готовые гетероструктуры кремния на сапфире (КНС) или нитрида галлия на сапфире ($\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$).

Второй этап — подготовка сапфировой подложки перед эпитаксией полупроводникового материала выходит за рамки требований технических условий на продукцию (сапфировую подложку), поэтому этот этап практически всегда остается «за кадром», является ноу-хау фирмы — изготовителя гетероструктур. Технология позволяет управлять качеством границы раздела сапфир — полупроводник, которая определяет стабильность поведения переходного слоя при последующих температурных воздействиях в технологическом цикле изготовления КМОП БИС, а также при специальных внешних воздействиях на готовую продукцию и др. испытаниях.

В процессе изготовления БИС КНС используются исходные гетероэпитаксиальные структуры кремния на сапфире с различной толщиной слоя кремния (0,6; 0,3; 0,1 мкм). Улучшение функциональных возможностей БИС, а также их отдельных характеристик для эксплуатации микросхем с повышенными требованиями по радиационной стойкости в открытом космосе предусматривает

применение структур КНС с меньшей толщиной слоя кремния и высокой однородностью свойств.

Минимальная толщина эпитаксиального слоя кремния во многом определяется величиной переходного слоя на границе раздела $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—Si}$. Считается, что переходный слой — слой повышенной дефектности, состоящий из сложных соединений кремния, алюминия и кислорода, возникает из-за несоответствия параметров решеток подложки Al_2O_3 и пленки Si, различия их термических коэффициентов расширения, а также вследствие автолегирования кремниевой пленки алюминием. Плотность дефектов уменьшается при увеличении расстояния от границы раздела. На первых этапах роста кремния с ориентацией (100) на сапфире (1012) образуются островки кремния с ориентацией (110). В работе [5] при помощи «просвечивающей» электронной микроскопии удалось показать, что плотность зародышей кремния с ориентациями (100) и (110) в начальный период времени резко изменяется. Плотность зародышей (100) уменьшается от величины $1,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ до $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ через 0,5 секунды от начала роста эпитаксиального слоя.

Столь резкое уменьшение количества зародышей является, возможно, результатом коалесценции зародышей. В то же время плотность зародышей с ориентацией (110) на протяжении первых 2,5 секунд роста остается постоянной ($4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$), а в течение следующей секунды уменьшается вдвое. Такая зависимость свидетельствует о том, что зародыши с ориентацией (110) стабильны по крайней мере, когда их размеры малы. В то же время изменение площади, занятой зародышами кремния с ориентацией (100) и (110) через одну секунду роста, отличается практически на два порядка (рис. 1.1).

Нарушение порядка расположения атомов, следующих за ближайшими соседями, приводит к образованию двойниковой конфигурации. Энергия двойников относительно мала, т. к. имеет место лишь незначительное изменение в диагональном расположении атомов.

Движение атомных слоев, в результате которых образуется двойник, похоже на движение при скольжении. Поскольку накопленная энергия деформации при образовании двойников мала, не следует ожидать значительных изменений электронной зонной структуры.

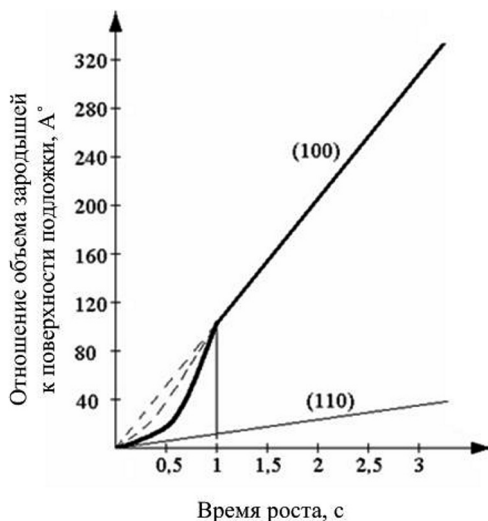


Рис. 1.1. Изменение толщины слоя зародышей во время роста эпитаксиальной пленки кремния с ориентацией (100) и (110)

Действительно, в случае ненарушенных двойников не было обнаружено значительных электрических эффектов даже при измерении времени жизни неосновных носителей. Этот наиболее чувствительный к структурным нарушениям электронный параметр почти не зависит от двойников, находящихся на пути движения носителей, если отсутствует градиент концентрации примесей. Это происходит потому, что процесс двойникования является естественным путем поглощения избытка энергии, выделяющегося при росте эпитаксиального кремния. Однако если кристалл содержит много двойников, то им всегда сопутствуют дефекты упаковки, заканчивающиеся на частичных дислокациях. Кроме того, скольжение двойниковых осей во многих случаях может создавать ненасыщенные связи (свободная валентность решетки), которые притягивают свободные электроны и образуют области пространственного заряда. При рассмотрении более сложных двойниковых конфигураций с их повышенной концентрацией с учетом боковых двойниковых границ показано [6], что боковые двойниковые границы оказывают влияние на структурно-чувствительные параметры, такие как подвижность и время жизни носителей заряда. Однако большие обла-

сти пространственного заряда, обусловленные р-п-переходами, менее подвержены влиянию двойников. Гетероструктура КНС с заметным числом двойниковых границ может, тем не менее, рассматриваться как электрически «хороший» материал. Наличие большого количества двойников в структурах КНС не препятствовало изготовлению воспроизводимых диодов и диодных матриц. Однако при изготовлении воспроизводимых МОП-структур такой материал использовать не следует, т.к. при приложении электрического напряжения смещения возможны необратимые изменения р-п-перехода и неоднородное распределение объемного заряда при формировании инверсионного канала проводимости.

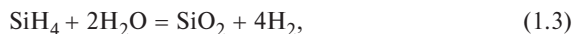
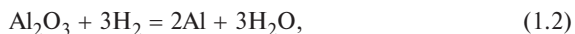
Разориентация или целенаправленное отклонение от ориентации подложки сапфира (1012) может приводить к перераспределению соотношения между зародышами кремния ориентации (100) и (110) и образованию зародышей с другими ориентациями, что возможно при блочном сапфире. Это может приводить к образованию участков с повышенной дефектностью и разбросу электрофизических параметров. Исходя из вышеизложенного, при выработке требований к подложке сапфира отклонение от заданной ориентации должно быть не более $1\div 2^\circ$.

Изучение морфологии гетероэпитаксиальных слоев кремния показало, что финишная полировка сапфировых подложек является одним из ключевых моментов при получении качественных структур КНС. Прямые методы контроля чистоты поверхности сапфировой подложки затруднены. Последующее же гетероэпитаксиальное наращивание кремния позволяет декорировать нарушенные участки, которые хорошо заметны при боковом освещении.

Гетероэпитаксиальное наращивание кремния проводят при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$ разложением моносилана в атмосфере водорода по реакции



Известно, что атомы кремния осаждаются преимущественно на узлах, занятых алюминием. Имеет место также реакция взаимодействия сапфира с газообразным водородом. Присутствие также SiO и SiO₂ может приводить к реакциям:



В начальной стадии роста по реакции (1.1) может идти и автолегирование алюминием растущего кремниевого слоя. Автолегирование может также идти от взаимодействия островков кремния с сапфировой подложкой:



Обратная сторона сапфировой подложки также может взаимодействовать с карбидизированным нагревателем по реакции (1.5), поэтому к подготовке и качеству нагревателя предъявляются повышенные требования.

Одним из путей снижения эффекта автолегирования растущего эпитаксиального слоя кремния алюминием является уменьшение или связывание кислорода на поверхности сапфира. В работе [7] по гетероэпитаксии GaAs и GaN были найдены такие решения путем наращивания на поверхности Al_2O_3 буферных слоев AlN.

При гетероэпитаксии кремния возможно также проведение прямого азотирования сапфировой подложки. Обычно в технологии эпитаксиального наращивания кремния используются карбидизированные графитовые нагреватели. Работы по прямому азотированию и модернизации установки эпитаксии заключались в использовании нагревателя из молибдена. Перед процессом эпитаксии сапфировую подложку обрабатывали при температурах $1100\div 1500^\circ\text{C}$ аммиаком в атмосфере инертного газа или водорода. По реакции



частично замещая атомы кислорода на азот, наблюдали образование твердых растворов AlN— Al_2O_3 , что заметно снижало эффект автолегирования и улучшало структурное совершенство наращиваемого слоя. Оценка структурного совершенства проводилась по полуширине кривой дифракционного отражения. Наличие подслоя нитрида алюминия позволяло уменьшить различие температурных коэффициентов линейного расширения подложки сапфира с кремнием.

Величина механических напряжений в структурах КНС может быть определена по формуле

$$\sigma = E_{\text{Si}}(\alpha_{\text{C}} - \alpha_{\text{Si}})\Delta T, \quad (1.7)$$

где E_{Si} — модуль упругости кремния; α_{C} — коэффициент теплового расширения сапфира; α_{Si} — коэффициент теплового расширения кремния; ΔT — изменение температуры.

При $\alpha_{\text{C}} = 5,3 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ и $\alpha_{\text{Si}} = 4,24 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ и значительной толщине пленки кремния напряжения в пленке могут достигать до 108 Н/м 2 . Значение $\alpha_{\text{AlN}} = 4,8 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ позволяет уменьшить раз-
личие в коэффициентах теплового расширения, поэтому применение буферного слоя из нитрида алюминия оправданно.

Обеспечение качества растущего эпитаксиального слоя представляет комплексную задачу. Наряду с подготовкой подложки (некоторые приемы изложены выше) очень важно также выбрать параметры процесса эпитаксии, которые обеспечивают требуемые структурные и электрофизические параметры гетероэпитаксиального слоя. На рис. 1.2—1.4 приведены качественные зависимости свойств эпитаксиального слоя от параметров процесса эпитаксии. Введение на первой стадии эпитаксии в состав газовой среды наряду с основным носителем кремния — моносиланом (SiH_4), добавок тетрахлорида кремния (SiCl_4) или дихлорсилана (SiH_2Cl_2), позволяет:

- улучшить коалесценцию зародышей кремния ориентации (100);
- подавить гомогенный процесс разложения моносилана в газовой фазе;
- уменьшить дефектность выращиваемых слоев, а также управлять величиной и типом заряда на поверхности раздела $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—Si}$ с помощью температуры процесса выращивания, охлаждения структур и скорости роста эпитаксиального слоя.

Для обеспечения радиационной стойкости р-канального транзистора необходимо, чтобы тип электропроводности кремниевого слоя на границе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—Si}$ был электронным.

При этом для уменьшения загрязнения наращиваемых слоев продуктами реакции процесс наращивания стараются проводить в две стадии:

- на первой стадии обеспечивается быстрое осаждение сплошной пленки кремния на поверхности сапфира для исключения взаимодействия водорода с сапфиром за счет пересыщения кремнийсодержащим компонентом и уменьшения температуры эпитаксии;
- на второй стадии выполняется медленное наращивание кремниевого слоя до требуемой толщины с более совершенной структурой.

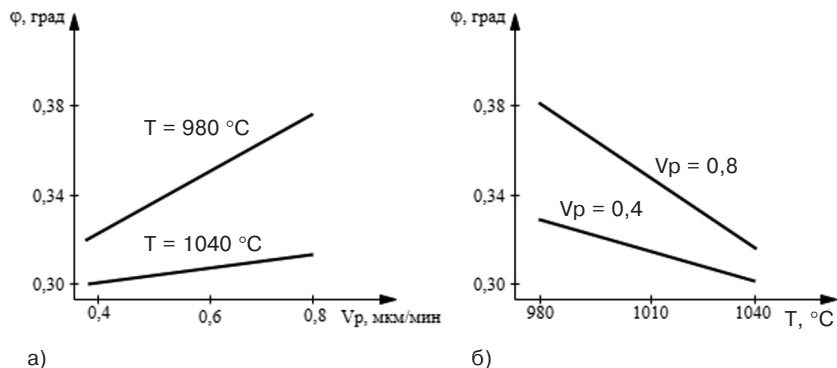


Рис. 1.2. Зависимости ширины кривой качания от скорости (а) и температуры (б) эпитаксиального наращивания слоя кремния

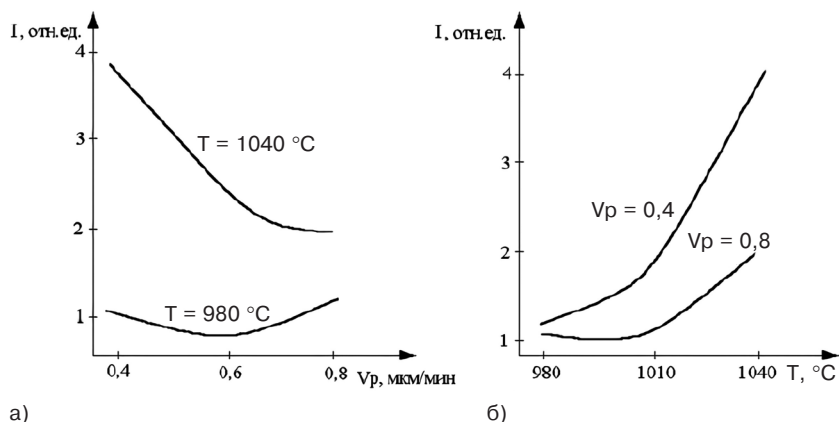


Рис. 1.3. Зависимости интенсивности рассеяния УФ-излучения поверхностью слоя КНС от скорости (а) и температуры (б) эпитаксиального наращивания слоя кремния

Дополнительным резервом улучшения качества гетероэпитаксиальных слоев кремния является, безусловно, повышение качества исходных компонентов, используемых в процессе гетероэпитаксии, и прежде всего по содержанию кислорода, остатков паров воды, примесей металлов, образующих глубокие уровни в запрещенной зоне Si.

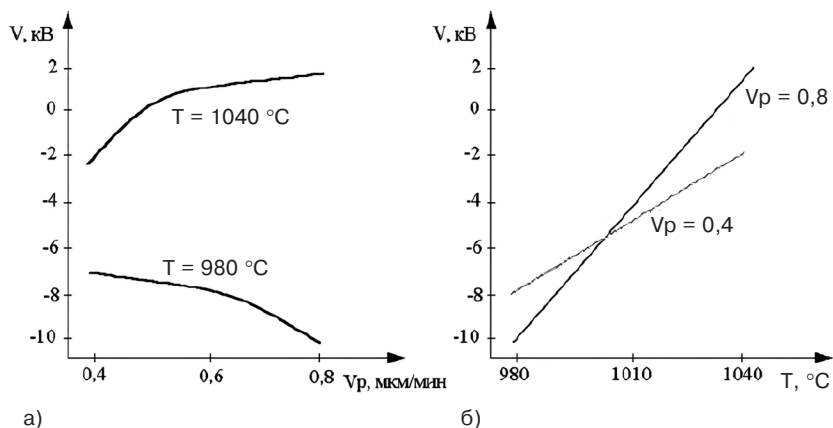


Рис. 1.4. Изменение величины прикладываемого внешнего напряжения со стороны сапфира для обеспечения минимальной проводимости слоя КНС от скорости а) и температуры б) эпитаксиального наращивания слоя кремния

Моносилан целесообразно использовать в смеси с аргоном, т.к. последний легче подвергается очистке. Необходимо исключить натекание в газовых линиях и эпитаксиальном оборудовании. Также целесообразен предварительный прогрев газовых линий подачи моносилана до $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ для «осушки» силана и окисления SiO до (SiO_2) с последующим улавливанием образующегося порошка фильтрами. Соблюдение требуемого режима нагрева и охлаждения структур КНС важно не только в процессе изготовления эпитаксиальных структур, но и во всем цикле изготовления КМОП интегральных схем для исключения термоударов.

1.2. Основные параметры КНС-структур для радиационно стойких КМОП-схем

Основным отечественным производителем пластин сапфира для высокочастотных и радиационно стойких интегральных схем является АО «Монокристалл» [4].