

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, СЛОЖНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ РЭА

ОБЗОР ПО КОНФЕРЕНЦИИ "ПУЛЬСАР-2007"

С 21 по 23 марта 2007 года в г. Владимире прошла VI научно-техническая конференция "Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА" ("Пульсар-2007").

Организаторы конференции: Управление радиоэлектронной промышленности и систем управления РОСПРОМА, Федеральный фонд развития электронной техники, МНТОРЭС им. А.С. Попова, ФГУП "НПП "Пульсар", ФГУП "ГЗ "Пульсар", ФТИАН, ИРЭ РАН, МИРЭА (ТУ), МГИЭТ(ТУ), ОАО "ЦНИИ "Электроника", ОАО "ОКБ "Планета".

Конференцию открыл директор ФГУП "НПП "Пульсар" А.Г.Васильев.

В соответствии с принятой концепцией развития радиоэлектронного комплекса, отметил А.Г.Васильев, решение основных задач в области твердотельной СВЧ-электроники предполагается поручить ведущим отечественным научно-производственным центрам, в число которых входит и ФГУП "НПП "Пульсар".

В "Пульсаре" разработана технология проектирования мощных кремниевых СВЧ-приборов, которая включает многоуровневое суммирование мощности отдельных кристаллов. Достижения в этом направлении всегда соответствовали уровню лучших зарубежных производителей кремниевых СВЧ-транзисторов. С использованием собственной компонентной базы разработаны и поставляются заказчикам различные комплексированные изделия военного и двойного назначения для систем наземного, бортового и космического базирования на основе твердотельных СВЧ-модулей. Работает уникальный испытательный центр, который занимается испытаниями на надежность, воздействие механических, климатических и специальных факторов, проводит отбраковочные испытания и диагностический контроль ЭКБ и комплексированных изделий.

И.Романова

Анализ современного состояния кремниевой твердотельной СВЧ-электроники показывает, что для дальнейшего развития этого важнейшего направления необходимы неотложные организационно-технические меры, направленные на преобразование предприятия в современный единый научно-производственный комплекс. Основные из них: создание трехуровневого центра проектирования (включая тепловое моделирование), нового цеха кристалльного производства кремниевых транзисторов и интегральных схем с проектными топологическими нормами 0,35–0,5 мкм, нового цеха кристалльного производства транзисторов и МИС на базе широкозонных полупроводников; физико-аналитического центра по разработке и изготовлению изделий радиоэлектроники на основе нанотехнологий.

Планируемое техническое перевооружение поможет "Пульсару" стать лидером среди предприятий радиоэлектронного комплекса.

Основное внимание на конференции было уделено новому направлению в полупроводниковой электронике – широкозонным материалам и приборам на их основе. Это направление начало формироваться 15 лет назад, и НПП "Пульсар" был пионером среди промышленных предприятий, которые занялись исследованиями новых полупроводниковых материалов и созданием промышленной технологии приборов на них.

Наибольший прогресс достигнут в создании нитридгаллиевых приборов. По сравнению с приборами на традиционных полупроводниковых материалах (кремний и арсенид галлия) приборы на нитриде галлия обладают следующими преимуществами:

- более широкой областью рабочих температур;
- более высокими рабочими температурами;
- более высокой радиационной стойкостью;
- большей величиной тока насыщения.

Эти преимущества нитридгаллиевых транзисторов позволяют устранить основные причины, сдерживающие создание твердотельных РЛС. Данные причины связаны, как правило, с недостаточным уровнем мощности СВЧ-элементов и твердотельных модулей СВЧ-передатчиков из арсенида галлия



(уровень мощности серийных приборов 60 Вт для С-диапазона и 25 Вт для Х-диапазона). Решить проблему увеличения мощности можно, разработав нитридгаллиевую технологию и создав на ее основе СВЧ-элементы (транзисторы и микросхемы) и модули передатчиков повышенной мощности для РЛС. СВЧ-транзисторы на нитриде галлия могут работать при напряжениях 30–50 В и при температуре рабочей области транзистора до 300°C. Это позволяет поднять выходную мощность СВЧ-транзистора на нитриде галлия на порядок (по сравнению с приборами на GaAs) и обеспечить температурный режим его работы в модуле СВЧ-передатчика без применения сложных систем охлаждения.

В НПП "Пульсар" для СВЧ-приборов на GaN использовались отечественные гетероэпитаксиальные пленки нитрида галлия на сапфире, выращенные на предприятиях: ОАО "Элма-Малахит" ДО ОАО "Концерн Энергомера" (Зеленоград), ЗАО "Светлана-Рост" (С.-Петербург), СПб ФТНОЦ РАН (С.-Петербург). Разработанные маломощные СВЧ-транзисторы на GaN имеют коэффициент шума не более 2,7 дБ и коэффициент усиления не менее 10 дБ на частоте 10 ГГц. Они устойчивы к ионизирующим факторам, выдерживают уровень СВЧ-мощности на выходе более 30 Вт. Поэтому их можно применять в приемопередатчиках АФАР без дополнительных устройств защиты. Таким образом, маломощные усилители (МШУ) на GaN-транзисторах уже сейчас не уступают по коэффициенту шума МШУ на GaAs-транзисторах с диодным устройством защиты – при меньших размерах устройства и более высокой надежности.

Чтобы мощная СВЧ- и силовая электроника на нитридгаллиевых транзисторах продолжали развиваться, необходимы гетероэпитаксиальные структуры, выращенные на кремниевых и карбид-кремниевых подложках, которые обладают более высокой по сравнению с сапфиром теплопроводностью. Это позволит реализовать СВЧ-транзисторы, обеспечивающие в С-диапазоне уровень непрерывной мощности 200 Вт и Х-диапазоне не менее 80 Вт.

Работа конференции проходила по пяти секциям.

1 секция. СВЧ-ПРИБОРЫ

Разработка СВЧ-приборов на широкозонных полупроводниковых материалах: алмаз, карбид кремния (SiC), III-нитриды (BN, GaN, InN и их соединения) – является одним из самых перспективных направлений в полупроводниковой СВЧ-электронике. Среди всех широкозонных полупроводников алмаз обладает наилучшим для твердотельных приборов сочетанием основных электрофизических параметров: $\Delta E = 5,45$ эВ, $\mu_n \approx 2200$ см²/В·с, $\mu_p \approx 1600$ см²/В·с, $T_{дебая} = 2200$ К, $V_{п. др. нас} = 2,7 \cdot 10^7$ см/с, $V_{р. др. нас} = 1,0 \cdot 10^7$ см/с, $E_{пробоя} = 1,0 \cdot 10^7$ В/см, $KTP = (1,1-5,0) \cdot 10^{-6}$ м/К (300-1300 К), теплопроводность $\lambda = 10-20$ Вт/см·К (в зависимости от кристалличес-

кого совершенства), $T_{плав} = 4000$ °С. На материале с такими свойствами можно разрабатывать приборы с параметрами, в десятки раз превосходящими параметры приборов на традиционных полупроводниковых материалах. Приборы на алмазе обладают самой высокой радиационной стойкостью, могут работать при температурах вплоть до 600°C, иметь рабочие напряжения до десятков киловольт. Благодаря уникально высокой теплопроводности на алмазе можно проектировать самые мощные высокотемпературные приборы, в том числе СВЧ. Однако, наряду с преимуществами, алмаз как полупроводниковый материал имеет некоторые недостатки:

- в настоящее время невозможно получить алмаз в виде пластин диаметром, пригодным для серийного производства приборов, т.е. ≥ 100 мм;
- при температуре свыше 600°C в атмосфере кислорода алмаз начинает графитизироваться и при 900°C превращается в графит;
- это самый твердый и химически стойкий материал, поэтому трудно поддается шлифовке, полировке и традиционным операциям в стандартной технологии создания областей р- и n-типа – диффузии, ионному легированию, "сухому" и "мокрому" травлению.

Этот комплекс научных и технологических проблем может быть решен только при развитии работ по "алмазной" технологии.

Проблемы разработки базовой технологии производства приборов на широкозонных III-нитридах специалисты НПП "Пульсар" рассматривали на примере гетеропереходных полевых транзисторов ГПТШ (HFET) на основе нитрида галлия. Это наиболее типичные СВЧ-приборы, на которых успешно реализованы возможности III-нитридных материалов. В целом технология изготовления приборов на III-нитридах за последние 13 лет продвинулась далеко вперед, и уже можно начать коммерческое производство. Однако имеет место целый ряд проблем, с которыми еще предстоит справиться.

- Одной из главных остается проблема качества исходных эпитаксиальных структур (ЭС), которые имеют очень высокий уровень плотности структурных дефектов (типичное значение 10^7 см⁻² для лучших образцов ЭС). Связано это с отсутствием подложек из родственных материалов (их очень сложно получить). В настоящее время для выращивания эпитаксиальных слоев III-нитридов для СВЧ-приборов в качестве подложек используются Al₂O₃, Si(111) и SiC. Качество выращенных на них III-нитридных ЭС и приборов на их основе определяется физическими свойствами подложек, такими как теплопроводность, близость коэффициентов согласования по параметрам кристаллических решеток и коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) с III-нитридом, а также термостойкость, возможность обработки поверхности до состояния "готовая под эпитаксию" и пр.

Чтобы заменить чужеродные подложки на подложки из родственного материала, необходимо решить проблемы получения слиточных монокристаллических материалов, в первую очередь нитрида галлия (GaN) и нитрида алюминия (AlN). Задача сложная, поскольку нужно обеспечить очень высокие давления и температуры при синтезе этих материалов.

Процесс эпитаксиального роста III-нитридов достаточно сложен и зависит от метода нанесения пленок, от материала источников, конструкции установок, температурных режимов роста, скоростей газовых потоков, от способа обработки поверхности подложки и многих других факторов. Все эти факторы влияют на кристаллическое совершенство слоев и должны быть строго оптимизированы. С этим связана проблема контроля качества III-нитридных ЭС. У нас в стране такой контроль отсутствует. Для решения этой проблемы необходим единый центр по исследованию качества структур на основе III-нитридов.

Однако работ по совершенствованию качества ЭС и использованию теплопроводящих подложек большого диаметра недостаточно. Необходимо и дальше совершенствовать технологию изготовления самих приборов на их основе: методы формирования мезаструктуры, создание омических контактов (ОК) и барьеров Шоттки (БШ) — сложных многослойных систем из тонких слоев металлов.

- Так как нитридные приборы работают при рабочих температурах 200°C и выше (вплоть до 500°C) и при высоких плотностях мощности, то для их стабильной и надежной работы требуются малые токи утечки. Эта проблема может быть решена в приборах с изолированным затвором (MISHFET). Как показывают эксперименты, в таких приборах токи утечки снижаются на три порядка и более, а мощности прибора возрастают более чем в 1,5 раза.

Проблема снижения токов утечки тесно связана с пассивацией поверхности нитридных приборов. Пассивация поверхности в нитридных приборах способствует их стабильной работе и повышает надежность благодаря нейтрализации ловушечных центров на поверхности кристалла и предотвращения захвата ими носителей. Выбор пассивирующих покрытий, их толщина и режимы нанесения существенно влияют на параметры прибора и требуют оптимизации.

- Актуальна также и проблема получения низкого теплового сопротивления в приборах. Она существует, несмотря на достаточно высокую теплопроводность самого GaN ($\Theta \approx 1,7$ Вт/см·К) даже при наличии теплопроводящей подложки. Утончение подложки и применение сквозных отверстий — традиционные способы снижения теплового сопротивления — не подходят при решении этой задачи для GaN из-за его высокой химической стойкости и твердости. Поэтому нужны новые методы. По этой же причине неприменимы и традиционные методы разделения пластин на

кристаллы для нитридных приборов. Проблему можно решить с помощью лазерной резки, для чего требуется соответствующее оборудование.

- Для монтажа в корпус кристаллов нитридных приборов, работающих при высоких температурах и высокой мощности, следует разработать новые высокотемпературные припои на основе сплавов Si-Au и Ag. Приборы на основе GaN малой и средней мощности ($P_{\text{вых}} = 1-2$ Вт) могут монтироваться в обычные металлокерамические и даже пластмассовые корпуса. Однако для высоковольтных мощных приборов с выходной мощностью в несколько десятков и сотен ватт нужны новые типы корпусов или модернизация старых.

Проблемы подложек для GaN-приборов нитрида галлия рассматривались во многих докладах.

Обычно эпитаксиальные структуры III-нитридов выращивают методом гетероэпитаксии на подложках из сапфира (Al_2O_3) или карбида кремния (SiC). Сапфировые подложки диаметром до 200 мм доступны, относительно дешевы, имеют хорошую полированную поверхность, устойчивы к химическим и термическим воздействиям, обладают высокой механической прочностью. Вместе с тем для них характерно сильное расхождение с III-нитридом по кристаллической решетке. Более того, сапфир обладает низкой теплопроводностью и непригоден для создания мощных приборов.

Карбид кремния, наоборот, легче адаптируется к III-нитридам и по постоянной решетке, и по ТКЛР, имеет высокую теплопроводность, однако доступны только двух- и трехдюймовые подложки SiC, но и они слишком дороги.

На конференции обсуждались и перспективы применения Si(111)-подложек.

Поиск дешевой кремниевой подложки еще с конца 1990-х годов заботил разработчиков приборов на GaN. Однако сильное различие параметров решетки и ТКЛР гексагональной GaN и кубической Si-подложек сделало проблему гетероэпитаксии GaN на Si чрезвычайно сложной. В принципе, она была решена уже в 2000–2001 годах: гетероэпитаксиальные структуры AlGaIn/GaN на Si(111) и первые HFET-транзисторы на них были получены методами MOCVD (компания Nitronex, США) и МБВ (фирма Picogiga + Soiteck, Франция) с использованием переходного слоя AlN и сложных слоистых структур типа AlGaIn/GaN. Но это за рубежом, а у нас (в частности в НПП "Пульсар") этому направлению необходима поддержка.

Во многих докладах подчеркивалось, что приборы на III-нитридах могут успешно конкурировать и даже превосходить приборы на традиционных полупроводниковых материалах, таких как Si и GaAs (и даже SiC).

Приборы на III-нитридах могут работать (как и приборы на GaAs) в диапазоне частот вплоть до 100 ГГц. При этом удельная плотность мощности в приборах на GaN составляет более 30 Вт/мм по сравнению с 1–1,5 Вт/мм для GaAs.



Приборы на III-нитридах способны работать в схемах экстремальной электроники и превосходят традиционные приборы по устойчивости к воздействию радиации и температуры.

Производство приборов на III-нитридах, безусловно, более экологически чистое, чем производство приборов на основе материалов, содержащих As, P и другие вредные вещества. Значительная часть докладов была посвящена разработке конкретных приборов на GaN.

В НПП "Пульсар" изготовлены мощные и малошумящие транзисторы на основе гетеролегированных структур AlGaIn/GaN на сапфире, проведены исследования различных конструкций гетероструктур от отечественных производителей, отработаны методики входного контроля гетероструктур.

Высокие параметры транзисторов нового поколения на гетероструктурах типа AlGaIn/GaN позволяют создавать на их основе мощные монолитные интегральные схемы (МИС).

Конструировать схемы можно несколькими способами, и все они имеют свои достоинства и недостатки. Один из них – создание чисто гибридной интегральной схемы (ГИС), когда все компоненты изготавливаются отдельно и соединяются в схему на плате с помощью проволочных соединений или полосками металлизационных слоев. Здесь каждый компонент схемы подбирается по наилучшему сочетанию параметров.

В монолитной ИС пассивные и активные элементы изготавливаются в одном технологическом процессе, при этом исключаются проволочные соединения между элементами схемы, кроме внешних выводов.

Существует еще один путь создания схемы – комбинированный, когда пассивные элементы схемы изготавливаются на одном полупроводниковом кристалле (пассивная МИС), а активные элементы монтируются на нее, создавая как бы миниатюрную гибридную схему. При этом можно измерять и отбирать активные элементы. Корректировка же элементов пассивной схемы значительно упрощается вплоть до полной ее замены, так как она изготавливается по отдельной технологической схеме. При таком способе активные элементы следует создавать по конструкции, дающей возможность обратного монтажа (Flip-chip) на пассивную МИС. Такой путь сочетает в себе некоторые преимущества ГИС (отдельный технологический процесс изготовления и даже подбор) и в то же время обеспечивает главное преимущество МИС – предельно малые габариты.

Высокая плотность удельной мощности GaN ГПТШ и высокое входное сопротивление позволяют расширить рабочую полосу частот, уменьшить габариты схем, улучшить тепловые характеристики и КПД устройств по сравнению с аналогичными МИС на GaAs.

Доклад руководителей ГЗ "Пульсар" был посвящен актуальным конструкторско-технологическим вопросам, связанным с изготовлением мощных СВЧ арсенидгаллиевых транзисторов S- и X-диапазонов.

В середине 1970-х годов потребность в радиоэлектронных системах, работающих в S-, X-, Q- и K-диапазонах длин волн, привела к появлению технологии GaAs полевых транзисторов с барьером Шоттки в качестве затвора. Актуальность проблемы объяснялась тем, что элементная база на Si в силу физических ограничений этого материала не позволяла успешно осваивать данные диапазоны.

Таким образом, с начала 1980-х годов на заводе "Пульсар" выпускаются малошумящие, средней и большой мощности полевые транзисторы на GaAs. Они широко используются в различных радиолокационных системах, в системах спутниковой и наземной связи в качестве элементной базы для усилителей мощности, автогенераторов, преобразователей частоты, работающих в различных поддиапазонах от 2 до 35 ГГц. По мере повышения требований к аппаратуре заказчика технология изготовления транзисторов и их параметры постоянно совершенствовались.

В середине 1990-х годов, чтобы повысить эффективность работы радиорелейных линий связи S- и C- диапазонов, на заводе были развернуты работы по модернизации серии GaAs-транзисторов большой мощности. Целью было – упростить применение данных приборов в усилителях мощности, повысить их широкополосность и КПД.

В обсуждении проблем развития приборов на арсениде галлия приняли участие специалисты Института СВЧ полупроводниковой электроники РАН (Москва) и ООО "НПФ "Микран" (Томск). Они разработали на GaAs монолитную интегральную схему малошумящего усилителя X-диапазона для приемопередающего модуля АФАР. Гетероэпитаксиальные слои были изготовлены в Институте СВЧ полупроводниковой электроники РАН.

Разработанный технологический маршрут предусматривает изготовление на гетероэпитаксиальной пластине малошумящих p-HEMT-транзисторов с длиной затвора 0,15 мкм и общей шириной 150 мкм, а также планарных конденсаторов, индуктивностей, объемных резисторов и сквозных металлизированных отверстий. Этот минимальный набор элементов достаточен для проектирования и построения СВЧ МИС.

Данная МИС представляет собой двухкаскадный малошумящий усилитель X-диапазона частот. В диапазоне частот 7–10 ГГц усилитель имеет коэффициент шума от 2,9 до 2,1 дБ. Усилитель питается от однополярного источника напряжения 5В. Ток потребления МИС МШУ – 22 мА.

Специалисты ОАО "ОКБ "Планета" (г. Великий Новгород) представили полевые транзисторы с барьером Шоттки на основе GaAs, предназначенные для работы в метровом–дециметровом диапазоне. Специалисты ОАО "ВНИИРА" (г. С.-Петербург) разработали базисный набор арсенидгаллиевых СВЧ МИС дециметрового диапазона: малошумящий широкополосный усилитель, СВЧ-усилитель с регулируемым усилением, широкополосный СВЧ-переключатель со

встроенной схемой управления, ряд малошумящих опорных генераторов с резонатором на ПАВ. Представлены также конструкции и S-параметры гибридно-монокристаллических модулей на основе разработанных МИС: антенных усилителей и активных авиационных антенн системы GPS-ГЛОНАСС.

Специалисты ИФП СОРАН (г. Новосибирск) представили материалы по развитию технологии молекулярно-лучевой эпитаксии для получения слоев арсенидов и нитридов металлов третьей группы.

Специалисты ФГУП "НПП "Исток" (Фрязино Московской области) и ЗАО "Светлана- РОСТ" (Санкт-Петербург) разработали мощный полевой СВЧ-транзистор на многослойной гетероструктуре $\text{AlN}/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}/\text{AlGaIn}$. Они представили результаты исследований по созданию транзисторов на оптимизированных многослойных гетероструктурах с двойным электронным ограничением, выращенных на подложках сапфира (0001) на установке аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии STE3N2 (SemiTEq). Обсуждались конструкция гетероструктуры $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}/\text{AlGaIn}/\text{AlN}$, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Al_2O_3 , планарная конструкция прибора и технология изготовления, характеристики транзистора в статическом и СВЧ-режимах, результаты ускоренных испытаний на надежность.

На предприятии ФГУП "НПП "Пульсар" функционирует система автоматизированного проектирования на ЭВМ (САПР) полевых транзисторов с барьером Шоттки и СВЧ интегральных схем. Система включает в себя программы моделирования СВЧ полупроводниковых приборов (активных элементов СВЧ ИС) собственной разработки и коммерческие программы схемотехнического проектирования СВЧ-приборов и ИС.

Разработанный на предприятии пакет программ моделирования СВЧ активных элементов содержит программы моделирования полевых транзисторов с барьером Шоттки на арсениде галлия и гетероструктурах $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$, $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ и $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$. Структуры полевых транзисторов могут иметь произвольный профиль легирования. Программы построены на основе квазигидродинамической модели переноса электронов и, следовательно, учитывают тепловую инерцию электронов (эффект "overshoot"), что необходимо для адекватного моделирования транзисторов с субмикронным затвором. Программа моделирования лавинного пробоя в гетероструктурных транзисторах с барьером Шоттки учитывает реальную конфигурацию поперечного сечения транзистора, включая двойное углубление под затвор с произвольными размерами. Кроме того, разработаны программы моделирования биполярных транзисторов с широкозонным эмиттером на гетероструктурах $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ и программы моделирования лавинно-пролетных и p-i-n-диодов на арсениде галлия. Также созданы программы сопряжения, которые по результатам моделирования полупроводниковых приборов рассчитывают параметры моделей активных элементов

ИС, входящих в состав коммерческих программ схемотехнического проектирования.

II секция. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Прогресс в силовой электронике основан на достижениях полупроводникового силового приборостроения и интегральной полупроводниковой микроэлектроники. Силовая электроника решает задачи энергосбережения, экономии материалов, а также важнейшие проблемы экологии.

Приборы на широкозонных III-нитридах в сравнении с традиционными полупроводниковыми приборами на кремнии (Si) и карбиде кремния (SiC) имеют преимущества в силу своих уникальных электрофизических параметров. Управляя большими токами (более 20 А) при высоких (до 10 кВ) напряжениях, они могут устойчиво работать при повышенных температурах (до 500°C). Одним из главных преимуществ силовых приборов на GaN по сравнению с приборами на Si и SiC является малое сопротивление во включенном состоянии.

Технология приборов на широкозонных III-нитридах еще не вполне совершенна, и приборы для силовой электроники находятся в основном в стадии разработки. Первый силовой диод на GaN на напряжение свыше 600 В запущен в производство относительно недавно, в 2006 году, фирмами Velox (USA) и STM (Europe). Тем не менее, характеристики этих диодов лучше характеристик диодов-аналогов на SiC, причем при более низкой стоимости.

ФГУП "НПП "Пульсар" имеет большой опыт разработки и выпуска силовых транзисторов, в том числе высоковольтных и силовых модулей питания на их основе, различных КМОП- и биполярных микросхем драйверов для управления силовыми и оптоэлектронными (ПЗС, ЖК-экранами) приборами.

В нескольких докладах подробно рассматривались конструкция и технологии изготовления кремниевых мощных высоковольтных биполярных транзисторов, управляемых изолированным затвором.

Специалистами НПП "Пульсар" разработана конструкция и технология IGBT на монокристаллическом материале без использования ЭС. Определены требования к монокристаллическому кремнию для IGBT. В соответствии с ними в ФГУП "НИИП" разработана технология изготовления и поставлено производство высокоомного монокристаллического кремния с прецизионными параметрами на основе бестигельного выращивания и последующего ядерного легирования монокристаллов кремния. На основе этого материала разработаны IGBT на напряжения 1200 В и токи 50 А и налажено их серийное производство.

Для повышения быстродействия, т.е. уменьшения времени выключения IGBT и ускорения рассасывания подвижного



заряда дырок, в высокоомную область IGBT вводятся центры рекомбинации. Время жизни неравновесных носителей заряда уменьшается в результате облучения структур потоком высокоэнергетичных электронов и последующей термообработкой (отжигом). Отжиг необходим для удаления спектра состояний с недостаточным временем существования в диапазоне рабочих температур IGBT. Получены соответствующие расчетные и экспериментальные зависимости времени включения и выключения от дозы облучения и условий отжига. С помощью данной методики удалось, в частности, добиться практически одинаковых времени включения (250 нс) и времени выключения (200 нс).

В отдельном докладе были представлены схемы для силовой электроники.

Микросхема 1474АП1Т (драйвер) предназначена для управления силовыми транзисторными ключами (СТК) на МДП и БТИЗ. Питается микросхема от одного источника ($U_{cc1}=15\text{ В}$) либо от двух: ($U_{cc1}=15\text{ В}$; $U_{cc2}=-5\text{ В}$), статический ток потребления – не более 15 мА.

Микросхема 1474ХХ1Т предназначена для защиты СТК и распределительных электрических сетей от аварийных перегрузок. Время задержки формирования низкого (высокого) уровня напряжения на основном выходе при включении (отключении) управляющего сигнала составляет не более 200 нс.

Микросхема 1474ХХ2Р представляет собой согласующий преобразователь для двухсторонней оптической связи с микросхемой защиты и управления 1474ХХ3Т. Микросхема обеспечивает повышенную помехоустойчивость за счет триггеров Шмидта, имеет прямой и инверсный входы, вход предустановки и вход обратной связи.

Микросхема 1474ХХ3Т предназначена для защиты и управления силовыми МДП-транзисторами и БТИЗ. Защита производится по уровню напряжения насыщения СТК. Имеется дополнительный вход тепловой (токовой) защиты. Питается микросхема от двух источников $U_{cc1} = 18\text{ В} \pm 10\%$, $U_{cc2} = -7\text{ В} \pm 10\%$. Допускается однополярный режим питания ($U_{cc2} = 0$).

III секция. ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Специалистами НПП "Пульсар" и ООО "РТК "Импекс" (г. Москва) создан ряд КМОП-микросхем первичного преобразования для линейчатых, субматричных и матричных фотоприемных устройств форматов 1х128 (2 типа), 2х64, 1х144, 16х576, 128х128, 256х256. Микросхемы осуществляют интегрирование тока детекторов в течение кадра (цикла) измерений, его части или произвольного времени с последующим выводом. При этом в микросхемах формата 1х128 интегрируется только информационная составляющая тока за вычетом его темновой и фоновой составляющих, которые запоминаются и хранятся в каждом канале в аналоговом или цифровом виде. В рамках докладов описаны структуры устройств и принципы их функционирования. Приведены

результаты измерения электрических параметров, в том числе и шумовых. Участники обсуждали результаты использования данных микросхем в ФПУ на основе фоточувствительных материалов PbS, PbSe (линейки), InSb (субматрицы и матрицы), AlGaAs-GaAs (линейки и матрицы), GaAs (линейки и матрицы, рентгеновские приемники).

Представлены разработанные в последнее время, но еще не изготовленные КМОП матричные микросхемы форматов 640х512 и 320х256, а также формата 4х288.

Обсуждались ближайшие перспективы создания фокальных процессоров с усложненной обработкой информации в фокальной плоскости, в частности с аналогово-цифровым преобразованием, многооконностью, многообъектным дальнометрированием и др.

В ФГУП "НПП "Пульсар" создан и выпускается ряд специализированных сцинтилляционных детекторов для визуализации гамма- и рентгеновского излучений на базе сборки "фотодиод-сцинтиллятор". Накопленный конструкторско-технологический опыт позволяет создавать приборы с высокими техническими параметрами, на уровне лучших мировых образцов. Основные области применения: "просвечивание контейнеров", таможенный контроль багажа, неразрушающий контроль в промышленности, системы безопасности. Приборы имеют конкурентоспособные цены.

В течение ряда лет в ФГУП "НПП "Пульсар" разрабатываются кремниевые детекторы ионизирующих излучений. Важное место среди них занимают приборы для визуализации рентгеновского- и гамма-излучений. Создан целый ряд приборов, спектр применений которых охватывает диапазон энергий излучения от 10 кэВ до 8 МэВ. Для сверхмягкого рентгеновского излучения (10 кэВ) пригоден метод прямого детектирования, для "промышленного" рентгена (200 кэВ) – первичное преобразование производится в CsI-сцинтилляторе, а для "просвечивания" металлических деталей толщиной до 20 см гамма-излучением 8 МэВ подходят сцинтилляторы PbWO₄ или CdWO₄. В любом случае в максимальной степени учитываются требования каждого конкретного проекта.

В НПП "Пульсар" созданы:

- твердотельные кремниевые фотоприемники видимого и ультрафиолетового диапазонов для систем наблюдения, обзора и контроля обстановки. Ячейка такого прибора состоит из фотодиода и экранированного от света вертикального регистра переноса. Встроенное устройство "антиблуминга" и простота электронного управления временем экспозиции обеспечивает диапазон рабочих освещенностей телевизионных устройств матричных ФПЗС от 10⁻²лк до 10⁵ лк без применения электромеханических диафрагм;
- матричные фотоприемники с зарядовой связью, работающие в режиме с временной задержкой и накоплением заряда – ВЗН (768 элементов в строке, 128 строк в ВЗН направлении, размер элемента 7х7 мкм²);

- матричные электронно-чувствительные ПЗС-КМОП для электронно-оптических преобразователей нового поколения. Предложена конструкция ЭЧ ПЗС с межстрочным переносом. Она представляет собой мультиплексор электронного потока, в котором входным элементом является диод-инжектор, накрытый металлической (например, алюминиевой) площадкой и выполняющий функцию коллектора электронов. ЭЧ-матрица предложенной конструкции не требует уточнения, так как засвечивается электронным потоком со стороны электродной структуры. Такая конструкция свободна от смаза изображения и позволяет производить первичную аналоговую обработку изображения ЭОП.

В НПП "Пульсар" разработаны линейные матричные кремниевые фотоприемники ИК-диапазона на кремнии, легированном галлием (как альтернатива фотоприемникам на основе кадмия-ртути). Достигнутые результаты и прогнозируемые характеристики свидетельствуют: фотоприемники на основе примесного кремния перспективны в тепловидении, тепловизионной, мониторинге Земли из космоса в длинноволновом ИК-диапазоне. Это направление задействует прорывные критические технологии высокого уровня, которые позволяют добиться невысокой стоимости, серийности, высокой надежности и долговечности фотоприемных устройств длинноволнового ИК-диапазона.

IV секция. СЛОЖНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ РЭА

Создание сложных функциональных блоков РЭА – одно из основных направлений деятельности НПП "Пульсар". В докладах были освещены вопросы конструирования четырехканального приемно-передающего модуля для АФАР L-диапазона.

Объединение нескольких приемно-передающих каналов в одном корпусе позволяет существенно уменьшить габариты модуля. Известно сложение нескольких каналов с применением планарной конструкции. Рассматривается объемная интеграция каналов в конструкции, обладающей осевой симметрией. Такой подход обеспечивает габариты полотна АФАР, необходимое для размещения в передней кромке крыла современного самолета.

Габариты модуля без учета выступающих элементов крепления и разъемов составляют $(60 \times 174 \times 214)$ мм³. При этом импульсная выходная мощность каждого канала – не менее 200 Вт, а полоса рабочих частот от 1 до 1,5 ГГц. Коэффициент шума приемных каналов – не более 4 дБ в той же полосе частот.

Реализация данной конструкции потребовала решения новых технических проблем.

Объемная интеграция затрудняет настройку и поузловую проверку устройства. Решить проблему удалось, разместив все четыре передающих канала непосредственно под съем-

ными крышками модуля (сверху и снизу). Еще два аппаратных этажа с приемными каналами и платами управления размещены под передающими каналами. Узел питания (схемы стабилизации и мощная батарея накопительных конденсаторов) находится в средней части модуля, он обеспечивает работоспособность модуля при длительностях выходного радиоимпульса до 30 мкс. Объемная интеграция требует обязательной проработки межузловых связей. В представленном и некоторых других вариантах конструктивного исполнения модуля, предназначенного для работы в течение длительного времени с невысокой скважностью, используется жидкостное охлаждение. Это усложняет конструкцию, однако рекордно малые габариты модуля удается сохранить.

Большая часть докладов была посвящена разработке конкретных элементов для сложных функциональных модулей.

Создан мощный широкополосный транзисторный усилитель для модуля АФАР L-диапазона с выходной импульсной мощностью 300–500 Вт и полосой рабочих частот от 1 до 1,5 ГГц, мощный стабилизированный источник вторичного питания с частотой преобразования более 1 МГц.

Специалисты ООО "НПФ "Микран" (г. Томск) представили комплект СВЧ управляющих GaAs МИС для системы АФАР.

Специалисты ОАО "НИИПП" (г. Томск) разработали базовую технологию и конструкцию малогабаритного приемно-передающего активно-пассивного модуля миллиметрового диапазона. Модуль отличается повышенной механической прочностью и поддерживает функции активного локатора непрерывного действия с двумя каналами приема: согласованной (с выходным сигналом) и ортогональной поляризации отраженного от цели сигнала и прием радиометрического сигнала.

Модуль имеет следующие характеристики.

- Энергетический потенциал каналов активной локализации не менее 100 дБ в полосе частот 2 кГц при отношении "сигнал/шум" – 20 дБ (153 дБ/Гц при отношении сигнал/шум = 1).
- Модуляционная чувствительность радиометрического канала 5К при полосе выходных сигналов 2 кГц.
- Диапазон электрической перестройки частоты генератора не менее 20 МГц при нелинейности не хуже 10%. (Реальная возможная перестройка 0,7–1,0 ГГц).

Приемопередающие СВЧ-блоки малогабаритных бортовых средств РЭП на арсенидгаллиевых ИС СВЧ разработки ОАО "Октава" (г. Новосибирск) представляют собой высокоинтегрированные, функционально и конструктивно законченные составные части бортовых радиоэлектронных средств противобоедействия.

Особенность процесса разработок – совместное проектирование радиоэлектронных систем и входящих в их состав комплектов арсенидгаллиевых ИС СВЧ-диапазонов 2–18 ГГц, 4–12 ГГц, 8–18 ГГц с уровнем выходной мощности от 30 мВт до 0,5 Вт.



V секция. НАДЕЖНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СФБ РЭА

В рамках секции рассматривались следующие вопросы.

- Механические напряжения в полупроводниковых приборах, вызванные тепловыми воздействиями. Коэффициенты теплового расширения материалов существенно отличаются друг от друга, и это — причина возникновения в соединенных высокотемпературной пайкой конструктивных элементах прибора напряжений растяжения, сжатия и изгиба. Использование в приборах AlN керамики и поликристаллического алмаза требует разработки новых конструктивных и технологических решений, учитывающих их сравнительно низкое тепловое расширение.
- Физические методы обеспечения надежности твердотельных СВЧ-модулей. Были проведены исследования физики отказов СВЧ-модулей. В результате выяснилось, что основной причиной отказов модулей являются отказы СВЧ-транзисторов. Последние связаны с усталостными явлениями в металлизации, которые возникают из-за циклического изменения температуры в импульсном режиме работы.
- Импульсная электрическая прочность СВЧ биполярных транзисторов при воздействии одиночных импульсов напряжения малой длительности. Экспериментальное и теоретическое исследование воздействия на СВЧ-транзисторы одиночных импульсов напряжения (ОИН) малой длительности и большой амплитуды позволяет определить механизм возникновения

отказов при воздействии на СВЧ-транзисторы ОИН малой длительности (5 и 50 нс) и большой амплитуды. Затем следует найти критерий оценки стойкости СВЧ-транзисторов к воздействию ОИН. Уже сформулирован критерий оценки стойкости к воздействию ОИН, который основан на предположении, что температура на границе металлизации и полупроводника не должна превышать температуру плавления эвтектики "металл-полупроводник". Показано, что температура на границе металлизации и полупроводника пропорциональна заряду, прошедшему через структуру при воздействии ОИН.

- Расчетно-экспериментальные методы оценки стойкости биполярных транзисторов к воздействию специальных факторов. Подход применялся для разработки расчетных и расчетно-экспериментальных методов оценки стойкости биполярных транзисторов. Были проанализированы требования по уровням воздействия специальных факторов, приведенных в нормативно-технической документации, и механизмов деградации параметров биполярных транзисторов при воздействии таких факторов. В результате удалось определить факторы, от которых зависит стойкость биполярных транзисторов — т.е. те факторы, которые вызывают наибольшую деградацию параметров-критериев стойкости. Предложенный подход может стать основой для разработки расчетно-экспериментальных методов оценки стойкости биполярных интегральных микросхем к воздействию специальных факторов. ○

i Новый тип памяти.

Уже не фантастика

Совместными усилиями исследователей Калифорнийского технологического института (CalTech) и Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе (UCLA) создан прототип молекулярного запоминающего устройства нового типа емкостью 160 Кбит. По размерам память (~130×130 мкм) сопоставима с белой кровяной клеткой.

Прототип памяти представляет собой многослойную структуру, формируемую слоями, содержащими 400 параллельных кремниевых (легированных фосфором, $n = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) и 400 перпендикулярных им параллельных титановых нанопроводов. Ширина проводов — 16 нм. Между слоями нанопроводов заключен монослой бистабильных молекул [2]-ротаксана, которые в соответствии с напряжением, подаваемым на пересекающиеся проводники, переключаются в два различных состояния, формируя логический 0 или 1. Таким образом, каждая область в пересечении проводов хранит единицу информации. Шаг проводников — 33 нм, размер ячейки — $11 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}^2$. Плотность записи данных составляет 10^{11} бит/см^2 . Это на порядок выше, чем в традиционных кремниевых элементах памяти. Согласно прогнозам, такая плотность для коммерческих кремниевых микросхем памяти будет достигнута лишь к 2020 году.

Цель работы, проводившейся учеными CalTech, мировыми лидерами в области формирования нанопроводов, и UCLA, уже 25 лет занимающимися разработкой молекулярных переключателей, — демонстрация возможности создания работающей электронной схемы с плотностью элементов, которая, согласно большинству оптимистических прогнозов, будет достигнута лишь через 10–15 лет. Работы ученых UCLA в области молекулярных ключей финансируются DARPA и Национальным научным фондом США.

Разработчики молекулярной памяти считают, что созданный молекулярный ключ найдет применение не только в компьютерной технике, а и в медицинской технике, альтернативных источниках энергии, системах безопасности. Правда, пока нельзя точно определить их область применения. Но жизнеспособность такого молекулярного ключа доказана.

*Nature, Jan. 25, 2007, v. 445, p.414–417. www.its.caltech.edu/~heathgrp/Papers/Paperfiles/2007/naturememory.pdf
www.smalltimes.com/articles/stm_print_screen.cfm?ARTICLE_ID=282981*