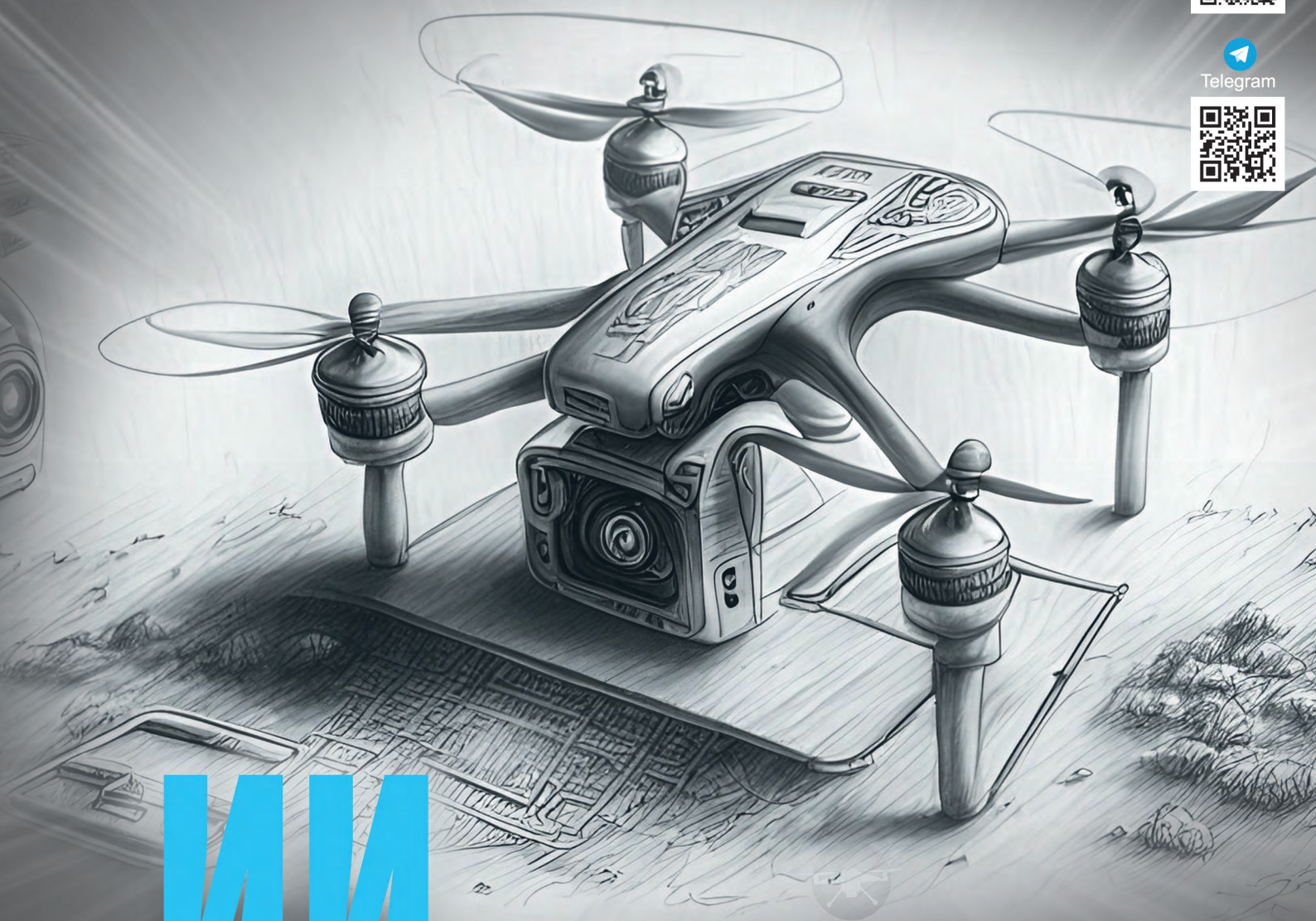
WWW.SOEL.RU

Современная электроника

5
2023

YouTube

Telegram



ИИ для дрона

В номере:

РАДСТОЙКОСТЬ НА ВЫСОТЕ:
полупроводники для космоса

ПЕРЕДАЙТЕ ТРУБКУ СЕРДЦУ:
инновации в телемедицине

ВАЖНЫЕ МЕЛОЧИ:
компоненты для современной электроники

ОДИН В ПОЛЕ ВОИН:
как квантовая точка стала транзистором

ЧИТАЙТЕ, КАК ВАМ УДОБНО

ПЕЧАТНАЯ И ЦИФРОВАЯ
ВЕРСИИ ЖУРНАЛА

ЖУРНАЛ С ГАРАНТИРОВАННОЙ ДОСТАВКОЙ

Современная Электроника

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

онлайн: www.soel.ru • +7 495 232-0087 • info@soel.ru
на почте: по каталогу «Урал-пресс» (индекс для печатной версии 36280)

rus-elektronika.ru

ЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ

Выставка электронной продукции российского производства

По вопросам участия в выставке обращайтесь, пожалуйста, в Оргкомитет: **+7 (812) 401 69 55, electron@mvk.ru**

Организатор:
Международная Выставочная Компания

Официальная поддержка:
МИНПРОМТОРГ РОССИИ

Партнеры:
БАЗИС
АКРП
Консорциум дизайн-центров

Реклама

Здравствуйте, уважаемые друзья!

Сможет ли Россия стать технологически независимой державой? На этот вопрос мы пытались получить ответ от многих авторов наших публикаций. Вот и в этом выпуске журнала хотим предложить вам статью, рассказывающую о нестандартном, творческом подходе вчерашних школьников, а ныне студентов вузов, к решению технических задач. Творческая, увлечённая молодёжь – главное богатство страны. Пока не перевелись такие люди, есть и все шансы на успех.

Мы продолжаем рассказ о будущем электроники – квантовых электронных компонентах, начатый в предыдущем выпуске журнала. Вторая часть статьи посвящена SET-транзисторам, в которых для усиления сигнала используется всего один электрон. Теория была разработана довольно давно, но до её промышленного применения прошли десятилетия исследований.

Продолжим знакомить вас и с разработками солидного возраста, которым вполне можно дать вторую жизнь при помощи технологически доступных и не слишком затратных модификаций. В одной из статей читайте о высоковольтном тиристоре с повышенным быстродействием, достигаемым благодаря уникальным изменениям в топологии прибора.

Как известно, нейтронное излучение вне магнитосферы Земли из-за своей высокой проникающей способности может создавать необратимые дефекты в полупроводниковых приборах. С освоением космического пространства радиационно-стойкие компоненты РЭА и специальные методы проектирования аппаратуры для космических объектов приобретают всё большую актуальность. Одна из статей посвящена исследованию этих вопросов.

В этом выпуске вы найдёте сразу три материала, посвящённых обзорам компонентной базы для электронных устройств: гибким миниатюрным высокочастотным соединителям, ПЛИС от компании Gowin Semiconductor и современным энергоэффективным микроконтроллерам семейства SAM от Microchip.

В заключение, уже традиционно, приглашаю вас посетить сайт и YouTube-канал «Современной электроники». Там, как обычно, вы найдёте много интересных новинок!

Всего вам доброго!

Юрий Широков, главный редактор

Журнал «Современная электроника»
Издаётся с 2004 года

Главный редактор Ю. В. Широков
Заместитель главного редактора А. В. Малыгин
Редакционная коллегия А. Е. Балакирев, В. К. Жданкин, С. А. Сорокин, Д. А. Кабачник, Р. Х. Хакимов
Вёрстка А. М. Бабийчук
Обложка Д. В. Юсим
Распространение А. Б. Хамидова (info@soel.ru)
Реклама И. Е. Савина (advert@soel.ru)

Учредитель и издатель ООО «СТА-ПРЕСС»
Генеральный директор К. В. Седов
Адрес учредителя и издателя:
117279, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 108,
пом/ком/эт I/67/тех
Почтовый адрес: 117437, г. Москва,
Профсоюзная ул., 108
Тел.: (495) 232-00-87
info@soel.ru • www.soel.ru

Производственно-практический журнал
Выходит 9 раз в год. Тираж 10 000 экз.
Цена свободная

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-18792 от 28 октября 2004 г.)

Отпечатано: ООО «МЕДИАКОЛОР».
Адрес: Москва, Сигнальный проезд, 19,
бизнес-центр Вэлдан.
Тел./факс: (499) 903-69-52

Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции.
Ответственность за содержание рекламы несут рекламодатели.
Ответственность за содержание статей несут авторы.
Материалы, переданные редакции, не рецензируются и не возвращаются.
Мнение редакции не обязательно совпадает с мнением авторов.
Все упомянутые в публикациях журнала наименования продукции и товарные знаки являются собственностью соответствующих владельцев.

© СТА-ПРЕСС, 2023

ЧИТАЙТЕ ЖУРНАЛ
в ЭЛЕКТРОННОЙ ВЕРСИИ
на сайте soel.ru
и
в ПЕЧАТНОЙ ВЕРСИИ
по подписке

СОДЕРЖАНИЕ 5/2023

РЕКЛАМОДАТЕЛИ

Innodisk ····· 57

Raystar ····· 39

Акметрон ····· 4

Доломант ····· 4-я стр. обл.

Морион ····· 5

НИИЭТ ····· 5

Суперайс ····· 4, 45

ЭЛЕКОНД ····· 29

ЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ ····· 1

ЭРКОН ····· 27

Читайте в «СТА» № 2/2023:

МУХА НЕ ПРОЛЕТИТ:
биометрия, которую не обманешь

ИЗ ПОДНЕБЕСНОЙ – В ПЕКЛО:
китайские ПЛК для ответственных применений

ОТ ВИНТА:
клеммные зажимы – эталон надёжности

Оформляйте подписку на журнал «СТА» и читайте печатную версию или электронную версию на www.cta.ru

РЫНОК

4 **Новости российского рынка**

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

6 **Квантовые электронные компоненты. Часть 2. Квантовые транзисторы**
Виктор Алексеев

18 **Техника России ближайших лет: «вечно летающие» дроны, кубсаты, мини-спутники на основе «параллельной» электроники**
Александр Гордеев

24 **Инновации электронных медицинских технологий из мирового опыта 2023 года**
Надежда Любимая

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

30 **ПЛИС фирмы Gowin Semiconductor: номенклатура, характеристики, разработка приложений. Часть 2. Средства аппаратной поддержки ПЛИС GOWIN**
Павел Редькин

КОМПЕТЕНТНОЕ МНЕНИЕ

37 **Замещение человеческого участия и тенденции искусственного интеллекта. Прогноз на 2023-й и последующие годы**
Антти Суомалайнен

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

40 **Современные продукты компании Microchip. Особенности 32-разрядных микроконтроллеров семейства SAM**
Юрий Петропавловский

48 **Гибкие миниатюрные радиочастотные соединители FMC для печатных плат**
Кива Джуринский

52 **Тиристор со статической индукцией с повышенным быстродействием**
Юрий Максименко, Виктория Грабежова, Александр Гордеев

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

58 **Ионизирующее излучение космического пространства и конструирование радиационно-стойких приборов для систем управления космическими аппаратами. Часть 1**
Сергей Кравчук, Владимир Соколов, Оксана Вовк, Михаил Марченко, Дмитрий Шеломанов

На правах рекламы

Новости российского рынка

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Модель: Sigen 425/425D, бренд: DORF Technologies

Компания «АКМЕТРОН» представляет новинку: генераторы сигналов произвольной формы+оцифровщик от Dorf Technologies. Модульные приборы устанавливаются в шасси стандарта PXI Express и позволяют решать типовые задачи тестирования РЛС, средств РЭБ, связи, навигации, а также решать задачи в области квантовых исследований.

Программирование модулей посредством Matlab и Python, а также встроенные блоки цифровой обработки сигналов для реализации сценариев тестирования устройств и обработки оцифрованных сигналов в реальном времени.

Характеристики серии Sigen 425/425D:

- 4 канала ГСПФ с частотой 2,5 Гвыб/с;
- разрядность ЦАП 16 бит;
- память 4 Гвыб;
- опция цифрового преобразования частоты;
- точность установки задержки ±5 пс;
- интерфейс PXIe Gen3×8.

Дополнительно в модели 425D:

- 2 канала оцифровщика с частотой 5,4 Гвыб/с, полоса пропускания до 9 ГГц;
- разрядность АЦП 12 бит.

Основные преимущества использования модульных генераторов Sigen 425/425D:

- многоканальность – до 36 каналов в 18-слотовом шасси PXI (с обеспечением синхронизации и когерентности между каналами);
- возможность формирования и анализа ШП сигналов (до 1,25 ГГц);
- большая память, возможность потокового воспроизведения, возможность формирования задач и сценариев, отсутствие разрыва фазы при мгновенной перестройке частоты;
- возможность формирования сложных телекоммуникационных сигналов с любым форматом модуляции;
- наличие ПО DORF Signal Studio для простой и интуитивной настройки приборов (настройка ЦАП, АЦП, маркеров, триггеров), а также формирования и оцифровки сигналов.

Записаться на демонстрацию прибора в лаборатории АКМЕТРОН:

+7 (495) 252-00-96
info@akmetron.ru

Электронные нагрузки ZKETECH с функцией заряда

Компания «Суперайс» является официальным дистрибьютором Zhuozhi Electronic Technology Co., Ltd., производителя электронных нагрузок под торговой маркой «ZKETECH».

Электронные нагрузки ZKETECH применяются для решения множества задач, в первую очередь они предназначены для:

- проведения испытаний, оценки характеристик, а также качества новых аккумуляторных батарей;
- сортировки и отбраковки АКБ на основе их остаточной ёмкости;
- выполнения планового обслуживания аккумуляторных батарей;
- подготовки АКБ к длительному хранению;
- восстановления полной ёмкости аккумуляторов после хранения.

Нагрузки могут применяться для испытаний широкого спектра аккумуляторов, в том числе NiMH, NiCd, LiPo, LiFe и Pb, а также портативных зарядных устройств. Все модели электронных нагрузок ZKETECH могут не только тестировать аккумуляторные батареи в процессе разряда, но и заряжать их. Что позволяет сопоставлять зарядную и разрядную ёмкости, а также анализировать их изменение в динамике при многократно повторяющихся циклах заряд-разряд.

Функциональные особенности нагрузок:

- разряд постоянным током или постоянной мощностью;
- заряд постоянным напряжением;
- установка времени паузы между циклами заряд-разряд;
- автоматический режим заряд-разряд в несколько циклов;
- регистрация напряжения, тока, ёмкости и времени прохождения цикла;
- высокая точность измерений до 0,2%;
- передача данных на компьютер с возможностью построения графиков и записью результатов испытаний в файл.

В зависимости от задач, требующих решения, компания предлагает три серии нагрузок.

1. Серия EBD-Axx предназначена для испытаний одиночных аккумуляторных элементов. Её отличают разрядное напряжение до 30 В, ток до 40 А, а также мощность до 200 Вт.
2. Серия EBD-BxxH используется для испытаний АКБ электрического транспорта, а также аккумуляторов в системах резервного электроснабжения. Нагрузки производятся с разрядным током до 20 А, напряжением до 89 В и мощностью до 1700 Вт.
3. Серия EBC-X разработана для массовых испытаний АКБ. Устройство позволяет испытывать до 8 элементов одновременно. Нагрузки рассчитаны на разрядные токи до 10 А и напряжение до 4,5 В. Специальное программное обеспечение позволяет объединить под общим управлением до 6 устройств EBC-X, увеличивая число одновременно тестируемых элементов до 48 штук.

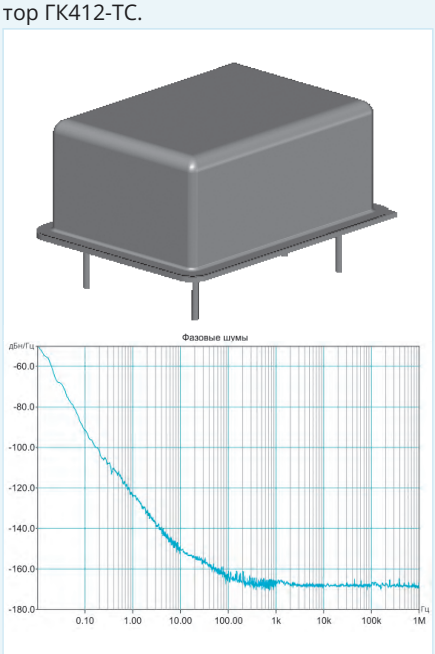
Компания «Суперайс»
supereyes.ru
8 (800) 550-13-57

На правах рекламы

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

Прецизионный малошумящий кварцевый генератор ГК412-ТС от АО «Морион»

АО «Морион» (Санкт-Петербург), ведущее предприятие России и один из мировых лидеров в области разработки и серийного производства кварцевых приборов стабилизации и селекции частоты, разработало и изготовило прототипы и готово освоить в производстве прецизионный малошумящий кварцевый генератор ГК412-ТС.



Генератор ГК412-ТС категории качества ОТК обладает очень низким уровнем фазовых шумов на отстройках, близких к несущей, а также высокой КНЧ на малых временах усреднения.

Основные характеристики генератора ГК412-ТС:

- стандартная частота: 10 МГц;
- напряжение питания: 5 В;
- интервал рабочих температур: от –40 до +80°С;
- температурная стабильность: до $\pm 5 \cdot 10^{-9}$;
- долговременная стабильность: до $\pm 2 \cdot 10^{-8}$;
- фазовые шумы для 10 МГц: до –87 дБн/Гц при отстройке 0,1 Гц, до –120 дБн/Гц при отстройке 1 Гц;
- КНЧ: до $2 \cdot 10^{-13}$ за время усреднения 1 с;
- габаритные размеры: 37×28×15 мм.

Основные области применения: телекоммуникационное оборудование, навигация, контрольно-измерительная техника, метрология.

За детальной информацией всех заинтересованных просим обращаться в АО «Морион» по тел. + 7 (812) 775-95-65.

www.morion.com.ru

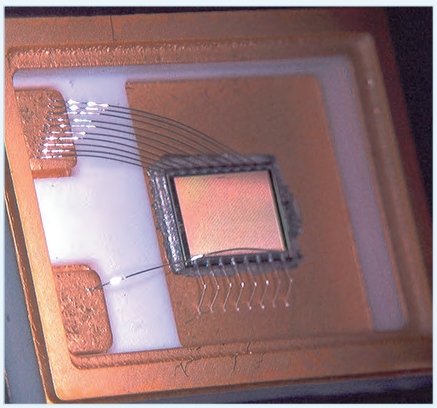
НИИ электронной техники запустил в серийное производство силовые GaN-транзисторы серии ТНГ-К

Воронежский НИИ электронной техники сообщает о начале приёма заказов на серийно выпускаемые силовые транзисторы серии ТНГ-К на основе нитрида галлия в металлокерамических и пластиковых корпусах.

Нитрид-галлиевая технология – одно из наиболее перспективных и быстроразвивающихся направлений в силовой и СВЧ-электронике в мире. Причина этого заложена в свойствах нитрида галлия, значительно превосходящего традиционный для полупроводниковой промышленности кремний по ряду ключевых параметров, таких как ширина запрещённой зоны, критическая напряжённость поля и дрейфовая скорость насыщения электронов. Благодаря этому GaN-транзисторы могут работать при более высоких температурах, на более высоких частотах, с большей плотностью мощности и энергоэффективностью, чем кремниевые.

НИИЭТ развивает данное направление уже более 10 лет, а в феврале 2021 года институт анонсировал доступность тестовых образцов новых GaN-транзисторов серии ТНГ-К, предназначенных для работы в качестве ключей в зарядных устройствах потребительской электроники, электромобилей, преобразователях энергии альтернативных источников и схемах электропитания аппаратуры различного назначения. В состав серии входит пять типов приборов (ТНГ-К 10030, ТНГ-К 20040, ТНГ-К 20020, ТНГ-К 45020, ТНГ-К 45030) в металлокерамических корпусах КТ-94.

Одним из преимуществ серии, уникальным для российского рынка производства ЭКБ, является то, что данные транзисторы – нормально закрытые. Это упрощает схемотехнику драйвера затвора, поскольку приборы такого типа не требуют отрицательного смещения на затворе для перевода транзистора в закрытое состояние. В сочетании с тем, что нитрид-галлиевые транзисторы, работая на более высоких частотах переключения, позволяют применять в конструкциях импульсных источников питания конденсаторы меньшей ёмкости, более простая схемотехника управления делает возможным существенное сокращение габаритов устройства при сохранении



его энергетических параметров. Этому способствуют и высокие значения КПД GaN-транзисторов, в случае серии ТНГ-К достигающие 97–98%.

Транзисторы ТНГ-К неоднократно демонстрировались на крупнейших российских выставках электронной и радиоэлектронной промышленности, где вызывали большой интерес со стороны посетителей. В апреле прошлого года образцы этой серии – уже в пластиковых корпусах – получили официальное признание со стороны экспертов отрасли: они принесли АО «НИИЭТ» первое место в конкурсе Electronica – 2022 в категории «Силовая электроника».

Теперь транзисторы серии ТНГ-К доступны для заказа. Предприятие освоило серийное производство данных приборов как в металлокерамических, так и в пластиковых корпусах, причём за прошедшее время специалистам НИИЭТ удалось увеличить напряжение пробоя сток-исток приборов до 900 В, тогда как данный параметр в данной серии изначально ограничивался 450 В.

«Насколько эффективной может быть нитрид-галлиевая технология при создании устройств силовой электроники, мы уже показали на примере наших зарядных устройств: мощность 95 Вт достигается в габаритах обычной зарядки для автомобильного прикуривателя, – отметил Владимир Малеев, коммерческий директор АО «НИИЭТ». – Спектр применения транзисторов серии ТНГ-К очень широк. Теперь производители силовой аппаратуры могут не просто оценить её преимущества на тестовых образцах, но и полноценно применять эти приборы в своей серийной продукции».

Отправить заявку на приобретение транзисторов серии ТНГ-К можно через форму обратной связи на сайте АО «НИИЭТ» www.niiet.ru/contacts/ или по электронной почте sbyt@niiet.ru.

Квантовые электронные компоненты
Часть 2. Квантовые транзисторы

Виктор Алексеев

Несмотря на то что теория одноэлектронных транзисторов (SET) и их первые лабораторные образцы появились в конце 1990-х, только спустя 20 лет технологии производства позволили выпускать небольшие партии SET, предназначенные для использования в приборах и оборудовании прикладного назначения. Технологий для массового производства SET-транзисторов, позволяющих выпускать конкурентоспособную по цене и качеству продукцию, сравнимую с классическими электронными компонентами, в настоящее время не существует. Поэтому основное применение одноэлектронные транзисторы нашли в областях научного, медицинского и метрологического оборудования.

Принцип действия одноэлектронного транзистора

В первой части статьи были рассмотрены так называемые квантовые точки (quantum dot – QD). В самом общем случае под этим термином понимают фрагменты полупроводника с размерами порядка нескольких нанометров, в котором электроны не могут перемещаться по определённым направлениям. Например, в обычном полупроводнике электроны двигаются по всем трём направлениям, а в двухмерном однослойном нанолисте (2D – nanosheets), состоящем из одного слоя атомов, электроны могут перемещаться исключительно в горизонтальной плоскости. В качестве другого интересного примера можно привести нанопроволоки, в которых наряду с квазиклассическим движением электронов вдоль проволоки было обнаружено квантование движения электронов в поперечном направлении [1].

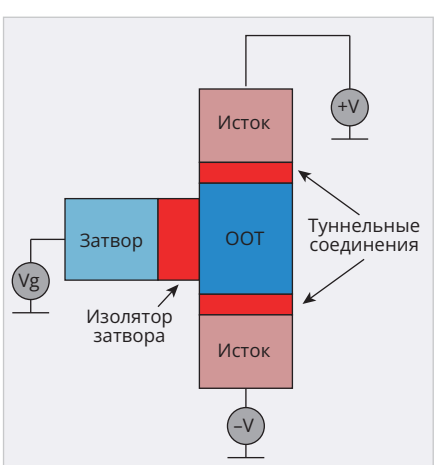


Рис. 1. Упрощённая классическая схема работы одноэлектронного транзистора [5]

Одной из уникальных особенностей полупроводниковых квантовых точек (QD) является кулоновская блокада (coulomb blockade – CB). Было обнаружено, что на полупроводниковой квантовой точке размером в несколько нанометров, имеющей туннельный переход с двумя контактами, прохождение электронов между этими контактами может быть заблокировано за счёт кулоновского потенциального барьера. Это объясняется тем, что электрон, находящийся на квантовой точке, создаёт электростатическое поле, препятствующее проникновению на QD другого электрона. Благодаря кулоновской блокаде очередной электрон сможет пройти через туннельный барьер квантовой точки только тогда, когда предыдущий электрон покинет пространство перехода. Основным условием возникновения эффекта CB является заметное превышение кулоновской энергии над значениями тепловой энергии электронов ($e^2/2C >> kT$). Это неравенство, безусловно, справедливо при криогенных температурах в несколько сотен мК. Для того чтобы кулоновская энергия была больше тепловой энергии при комнатной температуре, используются специальные методы снижения ёмкости квантовой точки, разработанные в последнее время [2].

Эти процессы положены в основу работы одноэлектронного транзистора – ОЭТ (single-electron transistor – SET). Вообще, SET работает аналогично обычному транзистору. Основное отличие заключается в том, что в процессе усиления напряжения SET участвует только один электрон.

Таким образом, SET-транзистор даёт возможность получения заметных изменений напряжения при манипуляции с отдельными электронами.

Пионерские работы с одноэлектронными транзисторами были проведены в начале 1990-х годов в Московском государственном университете. Российские ученые Д.В. Аверин, А.Н. Коротков и К.К. Лихарев опубликовали в 1991 году статью, в которой было продемонстрировано взаимодействие между зарядкой одного электрона и эффектами квантования энергии в процессах с полупроводниковыми гетероструктурами и металлическими туннельными переходами малой площади. Можно сказать, в этой статье был обоснован принцип работы одноэлектронного транзистора [3].

Гипотетическая схема логического элемента «НЕ-И», собранного на основе одноэлектронных кластерных транзисторов, была предложена С. Вышенским, К. Лихаревым, С. Полонским. В 1996 году российские физики С.П. Губин, В.В. Колесов, Е.С. Солдатов, А.С. Трифонов, В.В. Ханин, Г.Б. Хомутов, С.А. Яковенко создали лабораторную модель одноэлектронного нанокластерного транзистора, работающего при комнатной температуре [4].

Упрощённая классическая схема работы одноэлектронного транзистора показана на рис. 1.

Подобно МОП-транзистору, одноэлектронный туннельный SET-транзистор имеет три электрода: исток, сток и затвор, а также два туннельных перехода, которые образуют изолированный проводящий электрод с малой ёмкостью, получивший название «island». В русскоязычной литературе этот электрод, который фактически является квантовой точкой (QD), называют либо «изолированный участок одноэлектронного транзистора», либо «островок одноэлектронного транзистора ООТ». Другими словами, ООТ представляет собой небольшой проводящий островок, содержащий регулируемое количество электронов, занимающих дискретные орбитали.

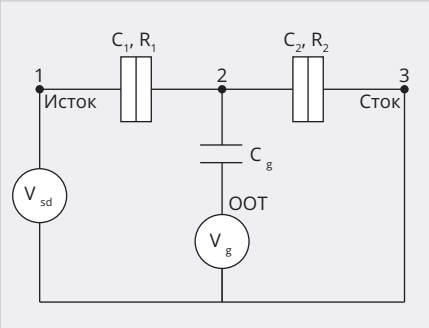


Рис. 2. Эквивалентная схема одноэлектронного транзистора

Эквивалентную схему одноэлектронного транзистора, показанную на рис. 2, можно представить в виде последовательного соединения двух туннельных переходов, к точке соединения которых добавлен ещё один управляющий электрод (затвор), который соединён с ООТ через ёмкость управления.

Эквивалентную схему одноэлектронного транзистора, показанную на рис. 2, можно представить в виде последовательного соединения двух туннельных переходов (C1R1, C2R2), к точке соединения которых добавлен ещё один управляющий электрод (затвор), соединённый с ООТ через ёмкость управления Cg.

Напряжение затвора Vg используется для управления открытием и закрытием SET, или, другими словами, оно управляет последовательным переносом электронов. На рис. 2 узел 1 представляет электрод истока (source), узел 2 – ООТ (island), а узел 3 – электрод стока (drain). Туннельные переходы, расположенные между этими узлами, характеризуются туннельными ёмкостями (C1, C2) и туннельными сопротивлениями (R1, R2).

При определённых условиях через ООТ, который изолирован от других электродов диэлектрическими прослойками, может протекать ток.

Необходимо подчеркнуть, что заряд проходит через ООТ в квантованных единицах. Из-за дискретной природы заряда ток, протекающий через туннельный переход, представляет собой последовательность событий, в которых только один электрон проходит через туннельный переход.

Когда электрон туннелирует через переход, туннельная ёмкость C1 заряжается элементарным зарядом, создавая напряжение, которое может быть представлено как $V = e/C$. Это напряжение противодействует проникновению другого электрона в туннельный переход (CB).

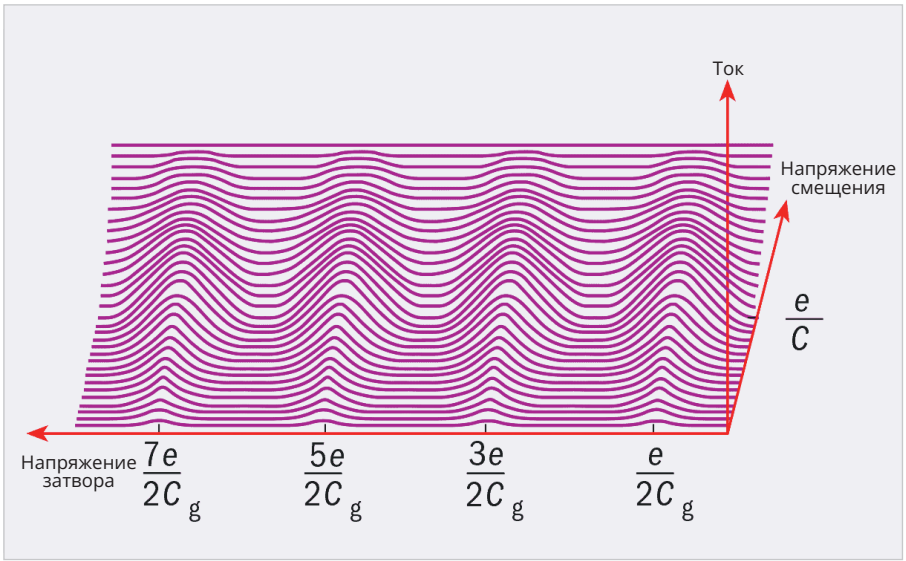


Рис. 3. Ток в SET-транзисторе, модулированный напряжением на затворе

В принципе, кулоновскую блокаду можно представить себе в терминах курса школьной физики как избыточное сопротивление туннельного перехода, возникающее при очень низких напряжениях смещения.

Если пренебречь квантовыми эффектами, то в очень грубом приближении туннельный ток первого порядка будет пропорционален приложенному напряжению смещения. Иными словами, туннельный переход, состоящий из двух проводников, разделённых изолирующим слоем, ведёт себя как ползунковый переменный резистор, сопротивление которого определяется толщиной барьера. С другой стороны туннельного перехода изолирующий слой работает как диэлектрическая среда, определяющая свойства туннельного перехода в качестве конденсатора. Кроме того, уровень электрического потенциала квантовой точки зависит также от величины ёмкостной связи Cg.

Электрон сможет преодолеть кулоновскую блокаду, если выполняются следующие условия: напряжение смещения меньше напряжения кулоновского промежутка ($V_{bias} < e/C$); тепловая энергия ниже энергии заряда ($kT < e^2/C$); туннельное сопротивление согласуется с принципом неопределённости Гейзенберга $RT > h/2\pi e^2$.

При повышении напряжения до порогового значения возникает туннелирование слева направо, а при повышении обратного напряжения выше порогового – справа налево.

В SET-транзисторе электроны, преодолевая два туннельных перехода, проходят через квантовую точку, постоянно заряжают и разряжают её. При этом заряд затвора регулирует перемещение электронов между истоком и стоком таким образом, что заряд QD будет кратен заряду электрона.

Из-за высокого значения сопротивления второго туннельного перехода электрон сначала дрейфует через первый туннельный переход и удерживается на ООТ. Затем, спустя некоторый промежуток времени, электрон начинает дрейфовать через второй переход. При этом второй электрон проникает на ООТ сквозь первый переход. Поэтому в процессе дрейфа электронов через оба туннельных перехода ООТ остаётся всегда в заряженном состоянии. Последовательный вход и выход электрона из одного соединения в другое получил название «коррелированное туннелирование электронов».

Экспериментально кулоновская блокада проявляется как пикообразная зависимость проводимости квантовой точки от её потенциала.

Когда электрон туннелирует в квантовую точку, поле в конденсаторе затвора возвращается к его начальному значению. Этот эффект показан на рис. 3 [6]. Ток, протекающий в одноэлектронном транзисторе, увеличивается с увеличением напряжения смещения между истоком и стоком и периодически изменяется в соответствии с напряжением на затворе.

Каждый раз, когда электрон туннелирует в ООТ, поле в конденсаторе затвора возвращается к его начальному значению.

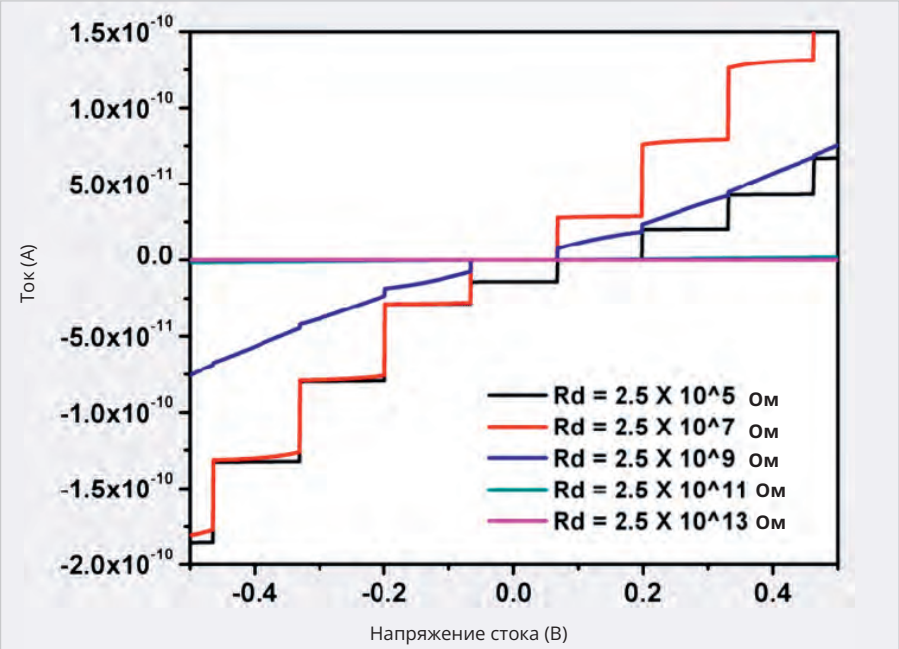


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики SET-транзистора для различных значений стокового сопротивления туннельного перехода [7]

Пики максимумов проводимости наблюдаются для значений, кратных половине заряда электрона. Минимумы проводимости видны при целых значениях, кратных заряду электрона. При напряжениях смещения, превышающих e/C, кулоновская блокировка нарушается, и проводимость не зависит от напряжения на затворе. При дальнейшем увеличении напряжения на затворе конденсатор затвора заряжается на величину заряда электрона, и ООТ возвращается в стабильное состояние.

Кулоновская блокада снова устанавливается, однако ООТ содержит один лишний электрон. Проводимость SET-транзистора изменяется в промежутке между минимумами для зарядов затвора, кратных заряду электрона, и максимумами для значений, кратных половине этой величины.

На рис. 4 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) SET-транзистора для различных значений стокового сопротивления туннельного перехода R_d при постоянном значении $Rs = 2{,}5 \times 10^{13}$ Ом.

В случае кулоновской блокады, когда в условиях низкого смещения сопротивление стока меньше сопротивления истока ($R_s < R_d$), ток будет равен нулю.

Когда приложенное извне напряжение перехода V превысит пороговое значение, и сопротивление стока станет больше сопротивления истока $R_s > R_d$, начнётся туннельный дрейф электронов.

При этом электроны попадают на ООТ через первый переход (source), а затем очень быстро перемещаются во второй переход (drain). Это быстрое перемещение избыточных электронов от одного контакта к другому увеличивает общий заряд ООТ, обеспечивая резкое нарастание тока (вертикаль ступеньки на рис. 4). Дальнейшее увеличение напряжения не приводит к возрастанию тока до тех пор, пока на ООТ не окажутся два электрона (горизонтальная часть ступеньки на рис. 4).

После того как напряжение достигнет значения, при котором можно преодолеть кулоновскую энергию двух электронов, ток снова начинает быстро возрастать.

Это приводит к ступенчатому увеличению характеристики. Поэтому ВАХ SET-транзистора получила название «Coulomb Staircase» (кулоновская лестница).

Таким образом, ток в цепи SET-транзистора будет протекать порциями, что соответствует движению единичных электронов. Управляя потенциалом на затворе, можно пропускать через кулоновские барьеры одиночные электроны. Это свойство открывает широкие перспективы для использования SET-транзисторов в качестве ключевого эквивалента МОП-транзисторов и элементов памяти в чипах следующих поколений.

Нанотрубки всё чаще стали применяться в качестве основы квантовых точек в конструкциях одноэлектронных транзисторов благодаря тому, что их проще изготавливать одного размера. Одно из очень ценных с точки зрения производства свойство SET-транзисторов на основе нанотрубок (NT) заключается в возможности размещения нескольких квантовых точек ООТ в одном транзисторе.

В работе [8] описан метод изготовления SET-транзистора с двойными квантовыми точками. Структурная схема такого составного транзистора показана на рис. 5а. Исходная заготовка в виде кремниевого нанопрофиля имеет в центре небольшое углубление шириной в несколько нанометров. Процесс окисления проводится так, что на краях канавки образуются два ООТ из тонкого слоя кремния (Si). Остальная часть тонкой кремниевой заготовки превращается в изолятор из диоксида кремния (SiO_2). Таким образом, были получены сформировавшиеся структуры основы транзистора с двумя ООТ, размещёнными на изоляторе (SiO_2). На следующем этапе на них наносились электроды и туннельный барьер.

Эквивалентная схема устройства такого транзистора показана на рис. 5б. На эквивалентной схеме W, L, d означают расчётные длину, ширину заготовки и глубину канавки соответственно.

На рис. 5б показана упрощённая эквивалентная схема с двумя кремниевыми областями, которая состоит из двух одноэлектронных транзисторов (T_s и T_d), связанных между собой параллельно через ёмкости туннельного перехода C_{s1}, C_{s2}, C_{d1}, C_{d2}. Верхний электрод представляет собой общий затвор, который управляет одновременно обеими областями.

Поскольку область в левом плече T_s не имеет над собой тонкого затвора, электростатический потенциал области управляется только верхним затвором. Поскольку нижний тонкий затвор здесь не полностью экранирует область проводимости, потенциал области в плече Td управляется как нижним (G2), так и верхним (G1) затворами.

В этой работе была реализована ёмкостная связь между двумя ООТ, что является необходимым условием построения универсальных одноэлектронных устройств различной конфигурации.

Предложенный в данной статье подход к конструкции одноэлектронного транзистора является перспективным, так как позволяет обеспечить высокую степень интеграции и сверхмалое

общее потребление микросхем, разработанных на основе SET-устройств.

В целом, среди основных привлекательных особенностей SET-транзисторов можно отметить: низкое энергопотребление, высокую чувствительность, минимальные размеры, высокую скорость работы, простую схему подключения, возможность совместной работы с CMOS-транзисторами.

Базовые технологии изготовления SET-транзисторов

На раннем этапе развития SET-транзисторов для их изготовления использовались методы электронной литографии, позволившие изготовить образцы с металлическими туннельными переходами субмикронных размеров и продемонстрировать общие принципы работы одноэлектронных транзисторов [9].

Дальнейшее развитие технологий продвигалось по двум основным направлениям: физическому и химическому.

Физические методы по большей части базировались на различных комбинациях тонкоплёночных и литографических технологий.

Химические методы в основном были направлены на синтез квантовых точек. Наибольшего успеха в этой области удалось добиться в области технологий коллоидного синтеза. Более подробно об этом было сказано в первой части статьи.

В настоящее время существует достаточно много различных способов, позволяющих изготовить образцы SET-транзисторов в лабораторных условиях, таких, например, как:

- сканирующая туннельная микроскопия (scanning tunneling microscopy – STM) [10];
- атомно-силовая микроскопия (atomic force microscopy – AFM) [11];
- электронно-лучевая литография (electron beam lithography – EBL) [12];
- сфокусированный ионный пучок (focused ionbeam – FIB) [13];
- метод использования углеродных нанотрубок (carbon nano tube – CNT) [14];
- литография с точечными контактами и полисиликоновыми тонкими плёнками (polysilicon thin film and point-contact lithography – PCL) [15];
- автоэмиссионная сканирующая зондовая литография (field emission scanning probe lithography – FE-SPL) [16];
- шаблонное окисление кремниевых наноструктур (pattern-dependent oxidation of silicon nanostructures – PADOX) [17];
- ультрафиолетовая наноимпринтная литография (nanoimprint lithography – UV NIL) [18];
- а также другие методы.

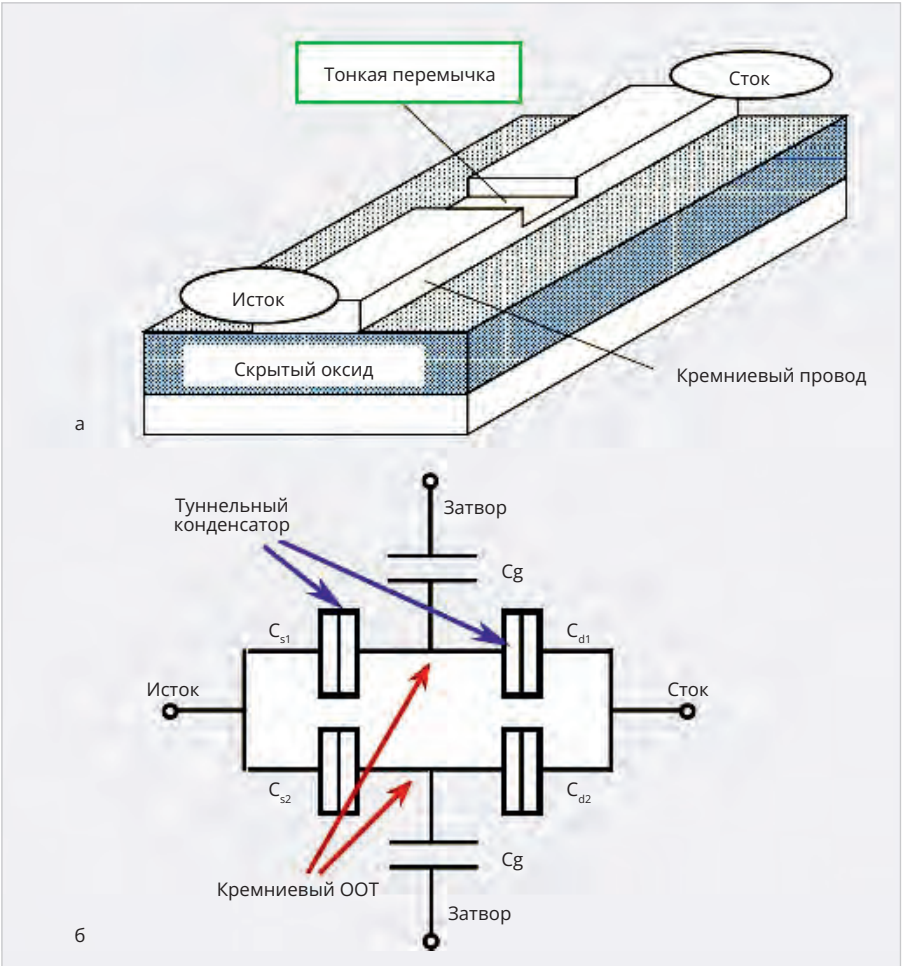


Рис. 5. Схема SET-транзистора с двумя ООТ, размещёнными на одной нанотрубке [8]

Перечисленные выше технологии и методы, за исключением FE-SPL, были разработаны в конце 1990-х и в начале 2000-х. Они достаточно подробно описаны в многочисленных научных публикациях.

Например, процесс изготовления SET-транзистора с использованием электронно-лучевой литографии (electron beam lithography) подробным образом описан в работе [19].

В этом объёмном отчёте также приведена детальная информация о процедуре изготовления туннельных переходов Al-AlOx-Al с помощью метода двойного напыления под разными углами [20].

Технология шаблонного окисления (pattern-dependent oxidation – PADOX) позволяет формировать на подложках типа «кремний-на-изоляторе» (silicon-on-insulator – SOI) наноструктуры заданной конфигурации. Например, эта технология использовалась для изготовления SET-транзистора с двумя ООТ, конструкция которого показана на рис. 5.

В технологии PADOX используется эффект возникновения деформаций в кремнии при окислительно-восстановительных реакциях.

Такие деформации возникают в переходных областях, в которых кремний превращается в диоксид кремния SiO_2. Напряжение сжатия, вызванное окислением, снижает вязкость диоксида на несколько порядков, что обусловливает округлые формы островков кремния после окончания процесса окисления.

В другой работе с помощью PADOX был изготовлен одноэлектронный транзистор с тремя точками ООТ. Специально сконструированная одномерная кремниевая нанотрубка с небольшими сжатиями в середине окислялась по заданной программе с поддержкой определённых режимов на каждом этапе процесса. В результате на этой трубке образовались три

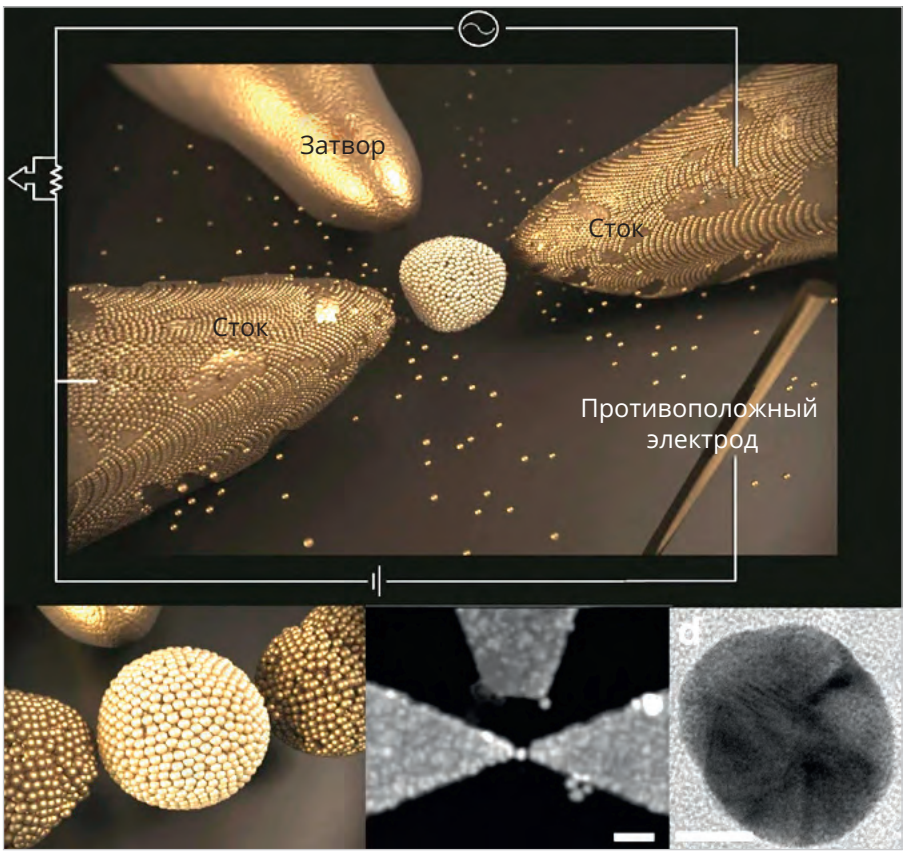


Рис. 6. Структура SET-транзистора с квантовой точкой, изготовленной из коллоидного золота

QD из кремния. Остальная часть нанотрубки окислилась до SiO_2. Это связано с тем, что накопленное напряжение тормозило процесс окисления в местах сжатия. На формирование двух боковых квантовых точек оказала также влияние сложная краевая структура двумерного кремния. Примечательно, что островки Si образовались самостоятельно без дополнительного привлечения литографического метода [21].

В последнее время нанопроволоки и однослойные углеродные нанотрубки (SWNT) завоёвывают всё бóльшую популярность в производстве SET-транзисторов. Изготовление SET-транзисторов с использованием SWNT зависит от метода нанесения туннельных барьеров. Одним из уникальных свойств SWNT является образование туннельного барьера нанометрового размера в местах перегиба углеродной квантовой трубки.

Подобная конструкция рассмотрена в статье [22]. Выгнутая в виде скобы углеродная нанотрубка (single walled carbon nanotubes – SWNT) размещалась на нижнем затворе из Al/Al_2O_3. С двух концов эта нанотрубка подсоединялась к электродам истока и стока Pd, размещённым на подложке Si/SiO_2.

Более крупные элементы транзистора, такие как контактные площадки, изготовлены с помощью фотолитографии и последующего термического напыления Cr толщиной 5 нм и Au толщиной 40 нм. Для массивов заготовок применялся метод электронно-лучевой литографии (EBL).

Готовые нанотрубки «CVD SWNT» производства «Cheaptubes» [23] размельчались с помощью ультразвука в растворе 1,2-дихлорэтана (DCE). Средняя длина нанотрубок после диспергирования составляет 2...5 мкм. С помощью центрифуги отбирались частички SWNT, которые проходили через затвор Al/Al_2O_3. Контакты из Pd шириной 25 нм, соединяющие исток (S) и сток (D) с SWNT, были изготовлены с помощью EBL.

Метод изготовления одноэлектронных транзисторов из углеродных нанотрубок с использованием сфокусированного ионного пучка описан в работе [24]. В этой работе была применена установка FIB (Seiko Instruments Inc. SMI9200), позволяющая получить ускоряющее напряжение 30 кВ и минимальный диаметр 7 нм для пучка ионов Ga+.

В процессе изготовления на пластине с помощью фотолитографии были сформированы контактные площадки Ti/Au (100/200 нм). Затем нанотрубки, синтезированные дуговым разрядом, были диспергированы на пластине. Положения нанотрубок были измерены с помощью сканирующей электронной микроскопии (scanning electron microscopy – SEM).

На следующем шаге изготовления с каждого конца нанотрубки с использованием FIB напылялись отрезки нанопроволоки. На последнем этапе в сформированные две канавки осаждались W-проводники.

Для изготовления одноэлектронных транзисторов (SET), работающих при комнатной температуре (RT), необходимы технологии, которые обеспечивают формирование наноструктур с высоким разрешением и точностью. Такие лабораторные методы существуют, но не могут быть использованы в серийном производстве, основное требование для которого определяется высокой производительностью и стоимостью конечного конкурентоспособного продукта.

Одним из таких методов является автоэмиссионная сканирующая зондовая литография (field emission scanning probe lithography – FE-SPL) с использованием криогенного реактивного ионного травления (cryogenic reactive ion etching – CRIE) [25].

Эта технология, позволяющая проводить пошаговый контроль качества элементов на отдельных этапах изготовления, даёт возможность изготавливать шаблоны размерами меньше 10 нм с очень высокой точностью.

В работе [26] автоэмиссионная сканирующая зондовая литография совместно с методом плазменного травления при криогенной температуре была использована для изготовления одноэлектронных транзисторов. Проведённые испытания показали, что полученные таким способом SET-транзисторы могут устойчиво работать при комнатной температуре, сохраняя базовые характеристики в течение длительного времени.

В работе [27] описаны технология производства и результаты тестирования контролируемых SET-транзисторов, изготовленных на базе металлических наночастиц. Процесс производства лабораторной партии представлял собой комбинированную методику, включающую нанолитографию (nanolithography), атомно-силовой микроскоп (atomic force microscope – AFM), наноманипуля-

ции (nanomanipulation) и электроосаждение (electrodeposition). На рис. 6 показана структура SET-транзистора с квантовой точкой, изготовленной из коллоидного золота.

Для изготовления электродов истока, стока и затвора из золота (Au) на подложке Si/SiO использовались методы фотолитографии и электронно-лучевой литографии (RAITH, ELPHY Quantum). Электроды разделены небольшим зазором около 10 нм, а электрод бокового затвора удалён на расстояние примерно 200 нм.

Использованные наночастицы представляли собой коллоиды золота диаметром 30 нм. Адсорбция отрицательной оболочки частиц на подложку реализовывалась за счёт электростатического взаимодействия с аминогруппами органического слоя. В качестве адгезивного слоя был выбран поли-L-лизин (P.L.L). Затем 10 мкл раствора размещали на модифицированной подложке, на которой возникали 20–30 коллоидов золота на площади около 1 мкм^2.

Для размещения наночастицы в нужном месте использовалась установка AFM-наноманипуляции (NanoMan system in DI Veeco 3100 Scanning Probe Microscope).

Для того чтобы связать полученную квантовую точку с выводами, использовался процесс электроосаждения, который контролировался с помощью измерения тока через зарождающиеся перемычки. На заключительном этапе этого процесса нейтральные атомы золота, образовавшиеся на поверхности двух золотых электродов, закрывали зазор между выводами и точкой.

Полученная таким образом наночастица содержит набор кристаллографических граней, как видно из изображения, полученного с помощью просвечивающего электронного микроскопа (рис. 6д). Кроме того, эти устройства характеризуются многоканальной связью, которая образуется с помощью набора атомов, распределённых параллельно наночастицам золота. Одноэлектронные транзисторы, изготовленные и протестированные в этой работе, продемонстрировали уникальный режим, в котором обнаружены статистически значимые многопериодические колебания проводимости в зависимости от напряжения на затворе. При этом дополнительные гармоники являются следствием кулоновской блокады.

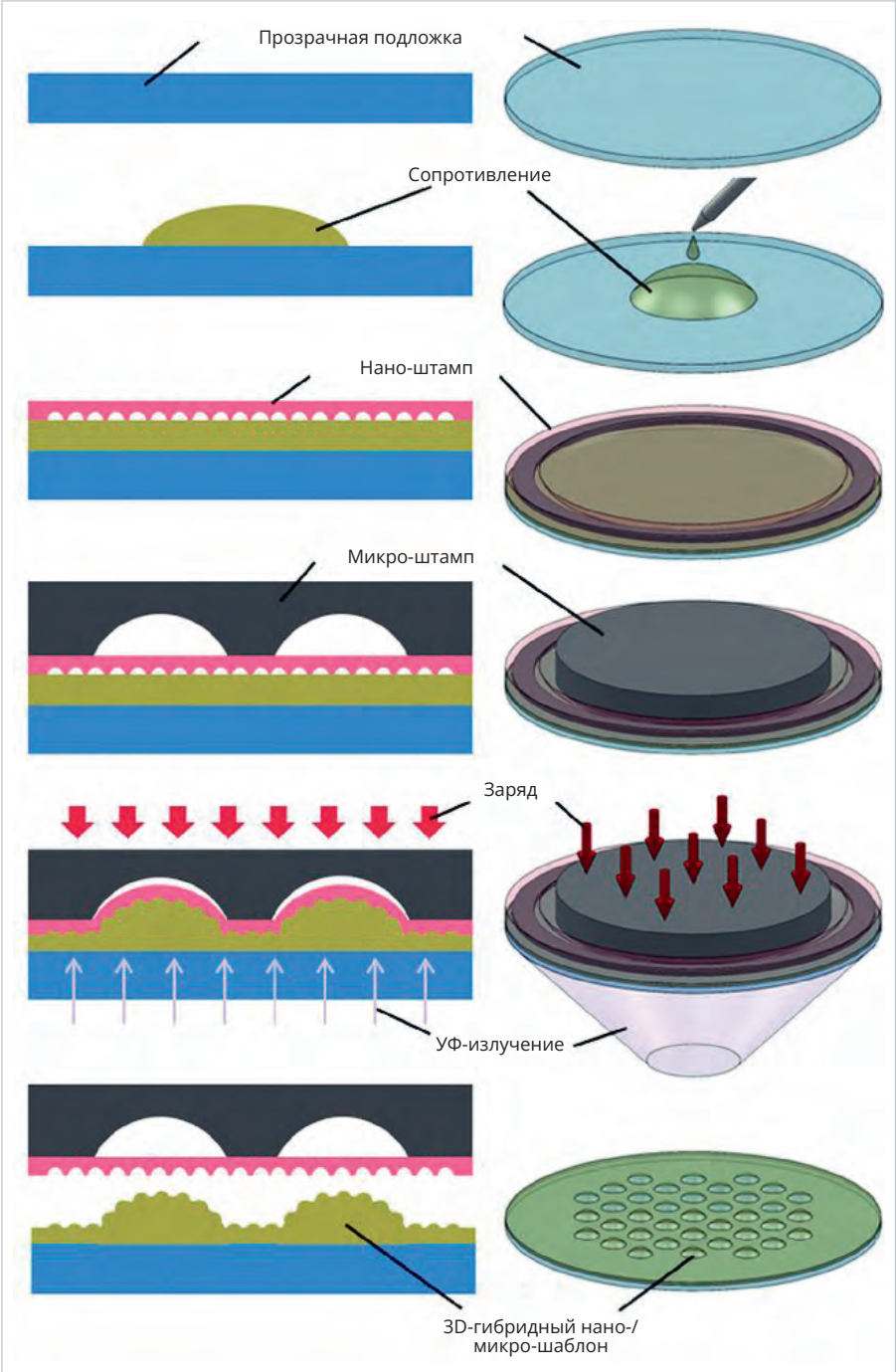


Рис. 7. Структурная схема UV-NIL процесса [29]

Недостатки технологий FE-SPL и CRIE, связанные с небольшой производительностью, можно компенсировать, объединив технологию FE-SPL с литографией наноимпринта NIL, которая позволяет воспроизводить элементы с высоким разрешением и обеспечивает высокую пропускную способность [28].

Из различных вариаций NIL-технологий можно выделить модифицированный метод пошаговой низкотемпературной, ультрафиолетовой наноимпринтной литографии (step and flash imprint lithography – UV-NIL).

Так же, как и в других литографических технологиях, в варианте UV-NIL используется штамп, с помощью которого необходимый рельеф переносится на полупроводниковую заготовку. Однако, в отличие от других способов, в этой технологии не требуются сложные и дорогостоящие оптические или электронно-лучевые системы.

Структурная схема изготовления электронных наноэлементов с помощью низкотемпературной ультрафиолетовой наноимпринтной литографии показана на рис. 7.

Штамп из прозрачного для ультрафиолетового излучения материала изготавливается предварительно с помощью других сложных прецизи-

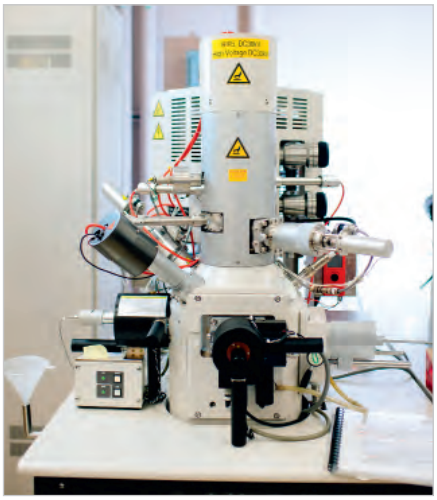


Рис. 8. Для нанесения вольфрамовых квантовых точек на поверхность образца использовалась серийная установка «Hitachi FB-2000A FIB» [32]

онных технологий. Процесс изготовления проводится без нагрева. Холодный штамп погружается в жидкий полимер, который затем затвердевает под действием ультрафиолетового облучения.

Главными преимуществами UV-NIL являются низкая стоимость, простота, высокая производительность и возможность производить изделия с размерами меньше 10 нм.

Вообще, технология NIL в различных опциях используется для разработок квантовых устройств уже более десяти лет. Например, в статье [30] описан модифицированный литографический метод «Step and Flash Imprint Lithography Reverse tone – SFIL-R™», в котором использовался сфокусированный ионный пучок (focused ion beam – FIB). Эта комплексная технология позволила получить одноэлектронные транзисторы, надёжно работающие при комнатных температурах (room temperature single electron transistors – RTSET).

Процесс SFIL, использующий технологию наноимпринта с низким давлением и низкой температурой на основе ультрафиолета (UV-NIL), был реализован с помощью стандартного оборудования производства Molecular Imprints Inc [31]. Образец шаблона был разработан с помощью программного пакета «Cadence IMPRIO 100». Изображение с шаблона передавалось на пластину при облучении электронным лучом электрочувствительного слоя на поверхности кристалла методом электронно-лучевой литографии (EBL). Технология SFIL-R фирмы Molecular Imprints® позволила получить именно положительное изображение на кварцевом кристалле. Нанесение образа шаблона на кварцевую пластину выполнялось с помощью системы JOEL 6000 EBL.

Для создания самоорганизующегося монослоя с низкой поверхностной энергией шаблон погружался в раствор фторированного силана, что обеспечивало селективный выход на границах травления.

Для подложки был выращен оксид кремния толщиной 300 нм.

На пластины методом центрифугирования наносили антиотражающее покрытие (brewer anti reflective coating – BARC) толщиной 80 нм. В процессе изготовления толщина BARC определялась с помощью измерителя толщины тонких плёнок «Woollam M-2000 DI».

В качестве резистивного слоя штампа (imprint resist) использовался «MI-1 IMPRIO 100» на основе акрилата с изоборнилакрилатом и диакрилатом этиленгликоля. Для того чтобы закрыть отпечатанные элементы, пластины покрывались слоем кремнийсодержащего полимера Silspin™.

Перенос рисунка на плёнку диоксида кремния был реализован с помощью процесса реактивного ионного травления (reactive ion etching – RIE). На первом этапе RIE смесь трифторметана (CHF_3) и кислорода использовалась для протравливания слоя Silspin. На следующем этапе образовывался диоксид кремния, и слой Silspin превращался в твёрдую маску.

На последнем этапе при удалении слоя защитного покрытия и антиотражающей пленки BARC проявлялась подложка. На этом перенос рисунка элементов SET на слой подложки завершался.

Затем с помощью электронно-лучевого испарителя (CHA e-beam evaporator) металлические части хрома и золота с размерами Cr – 10 нм и Au – 10 нм соответственно осаждались на рисунке пластины.

Для нанесения вольфрамовых квантовых точек на поверхность образца использовалась серийная установка «Hitachi FB-2000A FIB» (рис. 8). Газофазный исходный реагент гексакарбонил вольфрама, $W(CO)_6$, распылялся на поверхность образца. При этом падающий ионный пучок разлагает газ с образованием плёнки. Этот процесс ионно-индуцированного химического осаждения из паровой фазы (CVD) контролировался с помощью выбора параметров сканирования луча, что позволило получить квантовые точки необходимого диаметра.

Толщина оксида определялась режимом химического окисления в растворе ледяной уксусной кислоты и перекиси водорода. Размер вольфрамовых квантовых точек регулировался временем процесса FIB. Описанная технология позволила получать квантовые точки диаметром 8,5 нм и высотой 3 нм.

Изготовленные таким образом RT-SET транзисторы тестировались с помощью полупроводникового параметрического анализатора (SPA) Keithley 4200-SCS.

Интеграция технологии SFIL-R с методом осаждения квантовых точек сфокусированным ионным пучком (focused ion beam – FIB) позволила получить монолитные массивы RT-SET-транзисторов. Особо следует отметить то, что использованная в данной работе установка для производства одноэлектронных транзисторов целиком собрана из стандартных законченных блоков, производимых известными мировыми производителями физико-химического оборудования [33].

Таким образом, эта технология может быть рассмотрена как один из возможных вариантов для мелкосерийного производства одноэлектронных устройств [34].

Более подробную информацию о технологиях производства наноструктур, разработанных в начале 2000-х, можно найти в обзоре [35], а также в детальной монографии [36].

Технологические вопросы массового производства SET-транзисторов

Кроме явных преимуществ SET-транзисторы имеют и ряд технологических проблем.

Для того чтобы одноэлектронный транзистор правильно функционировал, необходимо, чтобы тепловая энергия электронов была ниже кулоновской энергии устройства, которая обратно пропорциональна суммарной ёмкости квантовой точки. В конце 1990-х годов первые лабораторные образцы SET имели размеры порядка десятков нанометров и обладали малыми кулоновскими энергиями. Для того чтобы преодолеть тепловой порог, одноэлектронные транзисторы приходилось поддерживать при криогенных температурах в несколько сотен мК.

Для работы SET-транзистора при комнатной температуре ёмкость ООТ должна быть меньше 10–17 Ф. Следовательно, его размер должен быть меньше 10 нм.

В одной из первых удачных попыток реализации SET, работавшего при комнатной температуре, использовался одноэлектронный транзистор с кремниевой квантовой точкой внутри узкого проволочного канала. Диаметр кремниевой точки был примерно 12 нм. Расстояние между энергетическими уровнями составляло около 110 мэВ. Однако кулоновская энергия в районе сотни мэВ слишком мала, чтобы обеспечить стабильную работу одноэлектронного транзистора.

В начале 2000-х годов японским физикам из Токийского технологического института удалось изготовить квантовую точку, туннельные переходы которой были сопоставимы с размерами, близкими к атомарным. Согласно выводам этой работы, SET-транзистор обладал кулоновской энергией порядка 250 мэВ, что позволило преодолеть кулоновскую блокаду и реализовать устойчивый перенос отдельных электронов при комнатной температуре 100 К [37].

Основным недостатком изготовленных таким методом туннельных барьеров является их очень высокое сопротивление. Поэтому ток в SET-транзисторах подобного типа примерно в 100 раз меньше, чем в SET-транзисторах, работающих при криогенных температурах.

Современные технологии дают возможность производить одноэлектронные транзисторы, работающие при комнатных температурах (RT-SET) с квантовыми точками диаметром 5–7 нм и туннельными переходами меньше нанометра, что позволяет уменьшить суммарную ёмкость транзистора. Однако при этом возникает другая проблема, связанная с ёмкостями истока, стока и затвора, которые могут быть порядка аттофарад (десять в минус восемнадцатой фарад). Такие параметры ёмкостей приводят к субпикосекундным значениям собственной постоянной времени, даже если сопротивление туннельного перехода снизу ограничено квантом сопротивления, равным h/e^2. От собственной ёмкости RT-SET-транзистора зависит его коэффициент усиления. Рассчитать эти величины с учётом возникающих квантовых эффектов достаточно сложно в рамках современной электродинамики и квантовой физики [38].

Ещё одна проблема RT-SET-транзисторов касается их собственных шумов. Так, например, для случая классической электроники шум характеризуется симметричной по частоте спектральной плотностью. С точки зрения квантовой механики нужно рассматривать две составляющие шума. Одна компонента шума передаёт энергию от измеряемой системы к электрометру, а другая – от электрометра к измеряемой системе. Существуют различные методы оценок квантового шума, у которых есть свои сторонники и свои противники. Тем не менее единого общепринятого мнения на этот счёт в настоящее время нет [39].

Ещё одна проблема из этой же серии касается фонового заряда RT-SET-транзисторов. Эти вопросы возникают из-за высокой чувствительности одноэлектронных транзисторов к заряду. Одной заряженной вакансии или внедрённого иона на квантовой точке может быть достаточно, чтобы переключить транзистор из проводящего режима в состояние кулоновской блокады. Одним из вариантов борьбы с этими нежелательными зарядами является использование гибридных схем с компенсирующими транзисторами.

Если RT-SET объединить с обычными FET-транзисторами, то, в принципе, можно получить гибридную схему, которая, с одной стороны, будет крайне чувствительна к заряду, а с другой – FET-транзистор обеспечит большой коэффициент усиления и низкий выходной импеданс. Один из вариантов такой схемы показан на рис. 9.

Результаты экспериментов по созданию таких гибридных устройств на базе SE-T и CMOS-транзисторов на одной подложке описаны в статье [40].

Для подключения к SET-транзистору были специально разработаны два типа усилителей напряжения КМОП/ПМОП с внешними резисторами истока и стока и инвертор КМОП, который обеспечивал усиление без внешних компонентов. Усилители подключались к SET-транзистору, расположенному на той же подложке, и тестировались при температуре около 1 К. В экспериментах с обоими типами усилителей наблюдались отчётливо выраженные ступеньки ВАХ, которые подтверждали наличие периодической кулоновской блокады при совместном использовании CMOS- и SET-транзисторов. Это может позволить в будущем объединять транзисторы технологии CMOS с квантовыми точками в переключающих автоматах. Также CMOS-транзисторы могут быть задействованы в комплекте с другими новыми устройствами и логическими типами, использующими SET в качестве детектора одноэлектронных событий.

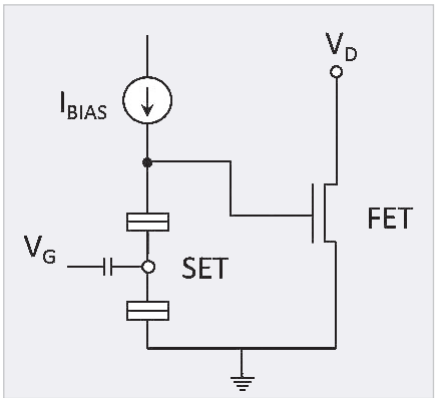


Рис. 9. Вариант гибридной схемы на базе SET- и CMOS-транзисторов на одной подложке

Основная задача любого массового производства электронных компонентов заключается в гарантиях идентичности всех параметров выпускаемой продукции, которые фиксируются в технической документации. Однако даже размеры квантовых точек в настоящее время не могут быть воспроизведены с большой точностью при массовом производстве.

Современные методы коллоидного синтеза позволяют получать полупроводниковые QD точки с размерами 5–6 нм. Однако далеко не все синтезируемые в одной партии QD имеют одинаковые свойства [41].

Существуют лабораторные методы сортировки, которые, в принципе, дают возможность отбирать одинаковые во всех отношениях единичные квантовые точки [42], но цена конечного продукта при таком выходном контроле будет крайне высокой.

Кроме того, на квантовых точках с размерами меньше 10 нм нужно разместить с большой точностью одинаковые туннельные переходы атомарных размеров и наноэлектроды вводов/выводов. Это добавляет ещё один вид погрешностей работы транзисторов.

В качестве одного из возможных путей решения проблемы абсолютной идентичности рассматриваются варианты «атомарного транзистора на одной молекуле». В этом устрой-

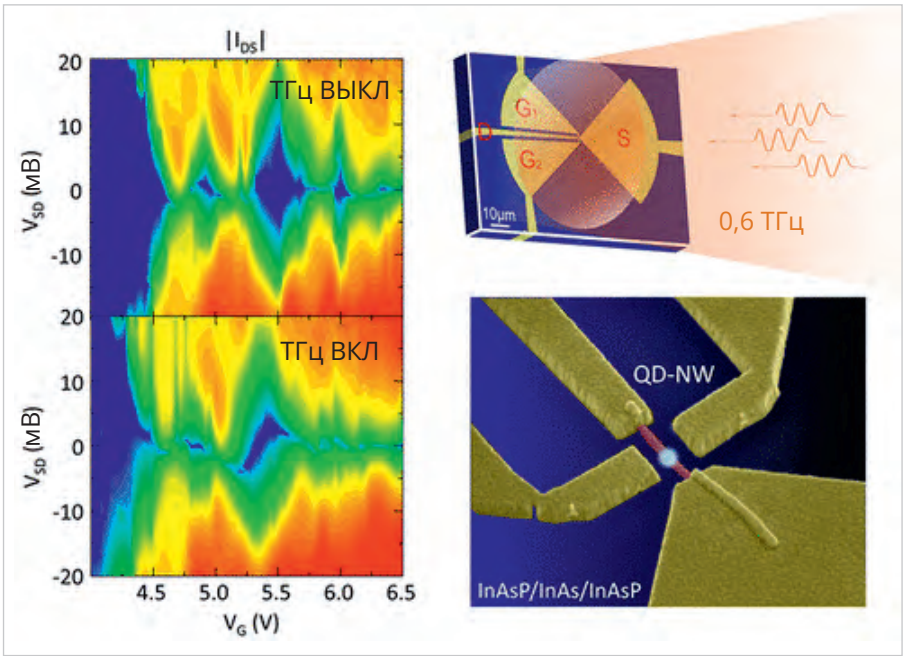


Рис. 10. Туннельные переходы SET-транзистора со встроенной нанопроволокой с QD на основе InAs/InAsP срабатывают при поглощении терагерцевого излучения [45]

стве роль «тела» транзистора играет молекула окислительно-восстановительного кластера, а в качестве носителей заряда выступают атомы.

Нужно также подчеркнуть, что технически сложно изготавливать в массовом количестве абсолютно одинаковые туннельные переходы атомарного размера, размещённые на квантовых точках с диаметром несколько нанометров. Рассмотренные выше методы изготовления SET пригодны для мелких партий RT-SET-транзисторов, предназначенных для уникального научного и медицинского оборудования. Но технологий и методов, пригодных для реального массового производства, сейчас нет.

Что касается проблемы интерфейсов SET-транзисторов, с помощью которых вводятся управляющие сигналы и выводятся текущие параметры, то в этой части исследования ведутся по нескольким направлениям.

Например, определённые успехи достигнуты в разработках бесконтактных систем вывода информации SET-транзисторов, аналогичных тем, которые используются в универсальных квантовых компьютерах. Например, используются детекторы электростатических и магнитных полей [43].

Оригинальное решение проблемы интерфейсов SET-транзисторов может быть найдено при использовании уникальных люминесцентных свойств квантовых точек. Так, в работе [44] в конструкции SET-транзистора нанопроволока с квантовыми точками на основе InAs/InAsP использовалась как в качестве ООТ, так и в качестве чувствительного элемента излучения субмиллиметрового диапазона (0,6 ТГц). Туннельные переходы SET-транзистора, размещённые на этой проволоке, срабатывали за счёт фототермоэлектрического эффекта (photothermoelectric – PTE), который проявлялся при поглощении терагерцевого излучения (рис. 10). Эти эксперименты показали, что если адаптировать энергию локализованных электронов в нужном частотном диапазоне, то квантовыми транзисторами можно будет управлять с помощью внешнего слабого излучения.

Примеры практического использования SET-транзисторов

В настоящее время теория и технологии изготовления SET-транзисторов развиты настолько, что позволяют выпускать небольшие партии, предназначенные для использования в приборах и оборудовании для научного, медицинского и метрологического применения.

Технологий, предназначенных для массового производства SET-транзисторов, позволяющих выпускать конкурентоспособную по цене и качеству продукцию, сравнимую с классическими электронными компонентами, пока ещё не существует.

Поэтому основное применение одноэлектронные транзисторы нашли в перечисленных выше областях.

Быстрое изменение проводимости делает одноэлектронный транзистор идеальным устройством для высокоточной электрометрии. В этом типе изделий SET имеет два электрода затвора, а напряжение смещения поддерживается близким к напряжению кулоновской блокады, чтобы повысить чувствительность тока к изменениям напряжения затвора [46].

Программируемые изменения напряжения на затворе SET-транзистора, вызывающие повторяющиеся эффекты кулоновской блокады, дают возможность модулировать ток, протекающий через область исток–сток. Такой подход стал отправной точкой для создания нового класса логических схем, использующих принцип управления с помощью единичных электронов. Например, одноэлектронные логические элементы на базе бинарных диаграмм (binary decision diagram – BDD), состоящие из нескольких джозефсоновских переходов, могут быть использованы в качестве одноэлектронных переключателей одного направления [47].

Попеременное прохождение через SET-транзистор тока, кратного количеству электронов, может быть использовано в качестве идеального эталона постоянного тока. Фазовая синхронизация может обеспечивать передачу определённого числа электронов за период внешнего радиочастотного сигнала [48].

Широкое применение одноэлектронные транзисторы нашли в различных приложениях квантовых компьютеров.

Несмотря на то что кремниевые спиновые кубиты считаются крайне перспективными в качестве масштабируемой платформы кубитов для отказоустойчивых квантовых вычислений, до конца не решённой остаётся проблема быстрого считывания с высокой точностью зарядовых и спиновых состояний. Устройства считывания должны точно срабатывать за периоды, которые меньше времени жизни когерентной квантовой системы.

Радиочастотные методы позволяют быстро считывать состояния спиновых кубитов GaAs. Однако большие ёмкости между накопительными вентилями и низкая двухмерная подвижность электронного газа вносят значительные ошибки в результаты измерений,

требующие соответствующей коррекции. Один из вариантов борьбы с этими нежелательными процессами описан в статье [49].

Устройство считывания на базе квантовой точки Si/SiGe с перекрывающимися затворами, являющееся, по существу, модернизацией SET, позволяет измерять синглетное и триплетное состояния двойной квантовой точки. При этом используются как обычная спиновая блокада Паули, так и механизм фиксации заряда. Точность считывания составляет для этих вариантов соответственно 82:9% и 99:0% за времена интегрирования 2,08 с и 1,6 с. Для однократного считывания односпиновых состояний с помощью спин-селективного туннелирования точность составляет около 99,9% за время интегрирования 300 нс.

Способ считывания состояния кубитов с использованием одноэлектронных SET-транзисторов на основе доноров в кремнии, которые были разработаны специально для измерения одиночных спинов со скоростями намного быстрее, чем время декогеренции спинов в изотопно-очищенном кремнии (270 мкс), приведён в публикации [50]. Разработанный SET-транзистор, имеющий большую ёмкостную связь между SET и целевым зарядом, обеспечивает однократное считывание полупроводниковых спиновых кубитов с точностью 97% за 1,5 мкс.

Несколько иной подход предлагает использовать резонаторы с высоким импедансом, тесно связанные с чувствительной точкой, в сочетании с параметрическим датчиком Джозефсона. С этой целью используется комбинированный SET, обеспечивающий быстрое высокоточное однократное считывание состояния спинов. Механизм преобразования состояния спина в заряд в этих схемах считывания использует блокаду спин-зависимого туннелирования.

Несмотря на то что описанное устройство требует меньшего количества электродов, чем обычные детекторы, точность считывания 99,2% достигается менее чем за 6 мкс [51].

Итальянские физики из института метрологии INRIM в Турине разработали оригинальное гибридное устройство нового типа, предназначенное для манипулирования одиночными зарядами, а также генерации импульсов квантованного тока [52].

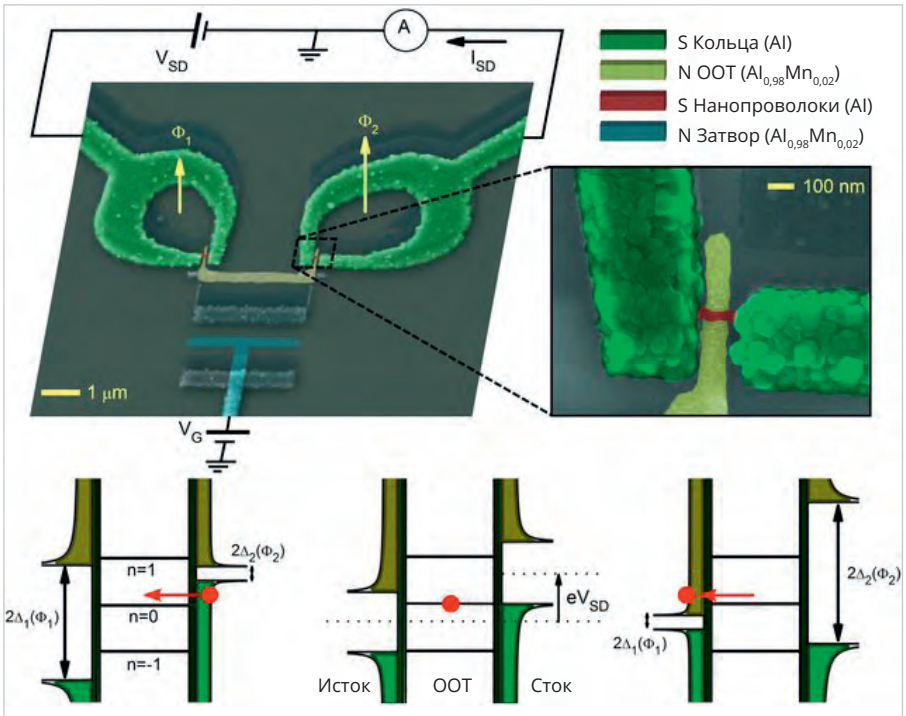


Рис. 11. Структурная схема гибридного SQUISET-транзистора [53]

По существу, предлагаемое в этой работе устройство представляет собой модификацию сверхпроводящего гибридного одноэлектронного транзистора, который авторы назвали «Superconducting Quantum Interference Single Electron Transistor» (SQUISET).

Структурная схема гибридного SQUISET-транзистора показана на рис. 11.

Короткая металлическая нанопроволока работает как слабая связь. Когда она прерывает сверхпроводящее (S) кольцо, плотность электронных состояний (DOS) сильно изменяется за счёт тесного контакта со сверхпроводником. Это даёт возможность управлять устройством через магнитный поток, пронизывающий петлю.

Данное свойство лежит в основе принципа действия сверхпроводящего бесконтактного транзистора с квантовой интерференцией (SQUIPT).

Квантовая интерференция, возникающая в сверхпроводящей нанопроволоке, может использоваться как инструмент управления, обеспечивающий регулируемый по фазе энергетический барьер. В свою очередь, использование этого регулируемого энергетического промежутка позволяет манипулировать зарядом в широком диапазоне функциональных возможностей.

Гибридный SQUIPT-транзистор предназначен для использования в квантовой метрологии, когерентной калоритронике и квантовых информационных технологиях.

Следует отметить, что когерентная калоритроника является быстро развивающимся научным направлением, предлагающим разработки в таких приложениях, как, например, трёхмерные наноантенны, кремниевые нанофотонные кольцевые резонаторы, наноисточники света, наносенсоры и другие. Подобные исследования проводятся также и в РФ. Так, в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова» и в «Московском физико-техническом институте» разрабатываются трёхмерные упорядоченные наноструктуры, кольцевые, а также петлевые подвешенные структуры на основе нанопроволок и другие актуальные направления [54].

Приведённый краткий обзор технологий изготовления SET-транзисторов и примеров их использования далеко не полностью исчерпывает эту тему. Вероятно, что от внимания автора могли ускользнуть некоторые новые публикации. Однако стоит обратить внимание на то, что за последнее время год от года наблюдается всё меньшее число публикаций о новых технологиях изготовления одноэлектронных транзисторов. При этом явно возрастает внимание к так называемым одномолекулярным одноэлектронным транзисторам (single-molecule single-electron transistor – SM-SET). Основная идея SM-SET заключается в том, что-

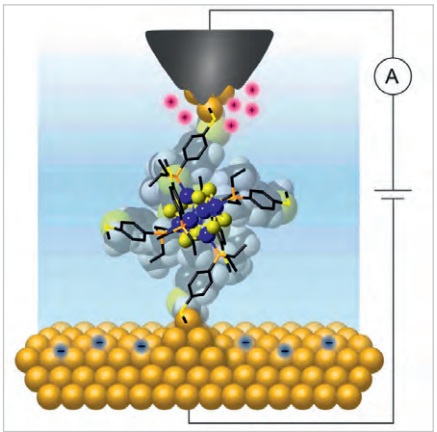


Рис. 12. Основная идея одномолекулярного SET заключается в том, чтобы использовать отдельные молекулы в качестве воспроизводимых электронных компонентов

бы использовать отдельные молекулы в качестве транзистора, в котором квантованный управляемый поток заряда может быть реализован при комнатной температуре. Первые экспериментальные образцы этих устройств учёные из Колумбийского университета (Columbia University in the City of New York) получили в 2017 году (рис. 12). В своей работе они продемонстрировали, что отдельные молекулы могут функционировать при комнатной температуре в качестве воспроизводимых электронных компонентов, таких, например, как транзисторы или диоды [55].

Не исключено, что SM-SET в ближайшем будущем будет рассматриваться либо как гибридное дополнение, либо как альтернатива RT-SET-транзисторам.

Более подробно об этих новых квантовых компонентах планируется рассказать в следующей статье.

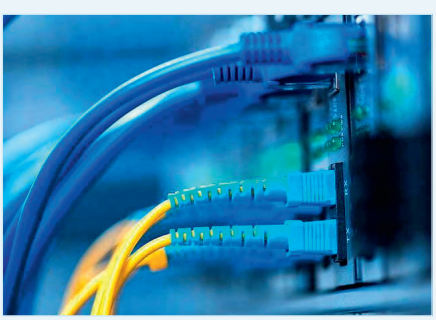
Литература

1. URL: bit.ly/3Lwv1dr.
2. URL: https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/coulomb-blockade.
3. URL: https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.44.6199.
4. URL: https://www.osp.ru/pcworld/2001/01/155936.
5. URL: https://physicsworld.com/a/single-electron-transistors/.
6. URL: https://physicsworld.com/a/single-electron-transistors/.
7. URL: bit.ly/3TpCFYY.
8. URL: bit.ly/3YUow7j.
9. URL: https://typeset.io/papers/observation-of-single-electron-charging-effects-in-small-1fqvneyl89.
10. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/573745.
11. URL:https://avs.scitation.org/doi/abs/10.1116/1.582347.
12. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/573745.
13. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1638756.
14. URL: bit.ly/3JnNFBs.
15. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/1650918.
16. URL: bit.ly/3TqQIgO.
17. URL:https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.40.L29/meta.
18. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/4617040.
19. URL: bit.ly/3mZiyVf.
20. URL: https://koreascience.kr/article/JAKO200916762901375.pdf.
21. URL: https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4936790.
22. URL: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0804/0804.0817.pdf.
23. URL: https://www.cheaptubes.com/.
24. URL:https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.43.5669/pdf.
25. URL: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5050773.
26. URL: bit.ly/3Jwpu3V.
27. URL: https://www.nature.com/articles/s41467-017-00442-6.
28. URL: https://avs.scitation.org/doi/abs/10.1116/1.5067269.
29. URL: bit.ly/3FwN13D.
30. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167931708006564.
31. URL: http://www.molecularimprints.com/.
32. URL: bit.ly/42ps04n.
33. URL: bit.ly/40fEwli.
34. URL: https://www.nature.com/articles/micronano201775.
35. URL: bit.ly/3liBf64.
36. URL: bit.ly/42jSCUJ.
37. URL:https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.36.L1257.
38. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/12/16/8139.
39. URL: https://www.nature.com/articles/nphys1339.
40. URL: https://avs.scitation.org/doi/10.1116/1.3597833.
41. URL:https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/52195.
42. URL: https://www.iasj.net/iasj/download/f7a1428d3d98a607.
43. URL: https://arxiv.org/pdf/1904.06560.pdf.
44. URL: https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.nanolett.1c02022.
45. URL: https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.nanolett.1c02022.
46. URL: bit.ly/40gUjAj.
47. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6600827.
48. URL: bit.ly/3YUtPUh.
49. URL: bit.ly/42pOi6b.
50. URL: https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.9.041003.
51. URL: https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.13.011023.
52. URL: https://arxiv.org/pdf/1603.05585.pdf.
53. URL: bit.ly/3LAqIOm.
54. URL: http://jre.cplire.ru/jre/feb19/14/text.pdf.
55. URL: https://www.engineering.columbia.edu/news/latha-venkataraman-single-molecule-transistor.

НОВОСТИ МИРА

Сделано в Китае, но оборудование российское: Минпромторг объяснил критерии оценки

Минпромторг сообщил об обсуждении с телеком-отраслью новых правил, которые вступят в силу в сентябре 2023 года. Речь идёт о начислении компаниям баллов за выполнение требований по соответствию критериям «отечественности» телеком-оборудования.



К нему относятся коммутаторы, маршрутизаторы, радиолокационное оборудование, телеприставки и другие устройства. Баллы будут начислять за выполнение базовых и необходимых требований, в частности, необходимо владеть правами на конструкторскую документацию изделий и исходный код системного программного обеспечения, располагать сервисными центрами для обслуживания, собственной производственной площадкой и т.п.

Только в случае выполнения всех требований и начисления нужного количества баллов оборудование будет внесено в перечень отечественного.

ferra.ru

«СТА-ПРЕСС» МЕДИАПОРТАЛ

ТОВАРИЩ!
БИЗНЕС РОСТ ЗАМЕДЛИЛ?
РАНО ВПАДАТЬ В СТУПОР!
НУЖНО КРИЧАТЬ О СЕБЕ НЕМЕДЛЯ,
А МЫ
ОБЕСПЕЧИМ РУПОР!

Используй все возможности продвижения, которые мы создали для тебя

Журналы

Уважаемые издания - качественная аудитория, готовая улышать вас!

YouTube-канал

Это ваша возможность интересно рассказать о себе

Сайты

Это ваши новости, оперативно доставленные по адресу

SOEL.ru
CTA.ru

Конференции

Здесь нет случайных людей - вы заведёте новые контакты и расскажете о себе специалистам!

Дизайн-студия

Наши дизайнеры и верстальщики сделают для вас эффективную рекламу, баннер, ролик

СТА
Современная Электроника

+7 (917) 517-46-18 / advert@soel.ru / cta.ru / soel.ru

Не стесняйся, присоединяйся!

Техника России ближайших лет: «вечно летающие» дроны, кубсаты, мини-спутники на основе «параллельной» электроники

Александр Гордеев (ООО «АГАТ», г. Москва)

Материал статьи скомпилирован на основании школьных проектов, выполненных в рамках программы Ульяновского Образовательного центра «Сириус» Лалей Нуриевой, Никитой Брескану, Максимом Сыровым (физико-математический лицей № 38, г. Ульяновск) и Ренатой Галимовой, выпускницей гимназии № 2 (г. Ульяновск), ныне студентов РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина (г. Москва), МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва), Московского политехнического университета, МГТУ им. Н.Э. Баумана соответственно, где наставником и руководителем проектов был автор этой статьи, будучи главным специалистом АО «Концерн радиостроения «Вега».

Вступление

В данной статье мы продемонстрируем необычайные научно-технологические возможности России в глубокой перестройке экономики [1], [2] на основе альтернативной на сегодня «параллельной» электронной индустрии [3], которая зарождается в текущий момент в периметре Росатома.

Статья направлена на преодоление «летаргии» в управляющих структурах в части развития отечественной электроники и на быстрое преодоление катастрофических последствий Программы импортозамещения от 2015 года в этой стратегической отрасли.

Катализатором является проект Программы негосударственной ФЦП развития отечественной электроники до 2030 года, разработанный автором данной статьи с индикаторами и показателями, опережающими мировой уровень на 5–7 лет на имеющейся в реальности в РФ технологической платформе.

Необходимость создания в РФ новой «параллельной» электронной индустрии

Электроника в России – **«дитя без глазу у семи нянек»** – Ростех, АФК, Росатом (цифра, алмаз), Роснано, Сколково, РАН, частные компании и даже концерн ВКО «Алмаз-Антей».

Россия катастрофически отстаёт по цифровым технологиям от зарубежного уровня (2-нанометровые микропроцессоры производства TSMC (Тайвань), Samsung (Корея)), и это отставание уже невозможно ликвидировать даже к середине текущего столетия, поскольку в нанотехнологическое оборудование, технологии и софт, с учётом имеющихся промплощадок Белоруссии и разработки полевых транзисторов, основ цифровых и логических ячеек, потребуются ежегодные вливания от $30 млрд. Существует и проблема с кремнием зонной плавки диаметром от 150 мм и выше. И хотя вложено свыше миллиарда рублей, но нет серийных SiC – монокристаллических подложек. Финансирование Минпромторгом ОКР систем Si-SiC-AlN-GaN или более дорогостоящих SiC-AlN-GaN (Концерн «Алмаз-Антей») также подчёркивает, что у нас нет качественного эпитаксиального GaN и, соответственно, гетеросистем на его основе под GaN pHEMT в стратегическом миллиметровом диапазоне (ЦРОФАР, ЦАФАР), на чём выстраиваются современные системы ПВО, боевая авиация, ударные БПЛА, космическая «смотрящая» навигационная и связная техника. Что касается монокристаллов GaAs, то нужно отметить наличие устаревшей, но в целом качественной технологии малого диаметра методом Чохральского диаметром до 3 дюймов в АО «Гиредмет» (Росатом), а также целенаправленное финансирование ОКР (свыше 1 млрд руб.) по VGF-методу выращивания слитков монокристаллов GaAs в Обнинске (за рубежом диаметр VGF GaAs кристаллов составляет 150 мм и выше).

Остаётся острейшая проблема с химреактивами особой чистоты, газами, качеством цветных металлов, BeO, AlN-керамикой и др.

Также необходимо отметить необходимость перехода от «семи нянек» к подчинённости одной организации, т.е. к созданию МЭП РФ, как это было в СССР, поскольку на кону национальный суверенитет.

Тем не менее, несмотря на вышеописанную мрачноватую картину, в России есть технологический и научный фундамент для прорывного скачка в развитии отечественной электроники с опережением зарубежного уровня на пять – семь лет в части экстремальной радиационностойкой электроники на новых уникальных монокристаллах арсенида галлия, полученного, в отличие от MOCVD классической технологии, используемой странами G7, новым жидкофазным методом, отличающимся возможностью создания «параллельной» мировой, новой электронной индустрии, значительно превосходящей всё, что создано на мировом рынке на таких материалах, как Si, SiC, GaN. Необходимо отметить разработанные в ИПМаш РАН, г. Санкт-Петербург (д.ф.-м.н. Сергеем Арсеньевичем Кукушкиным), «тринитридные» технологии выращивания кристаллов SiC, GaN, AlGaN с рабочими температурами в три раза выше, чем на Si, GaN, SiC, а также сверхпроводящих систем при комнатной температуре и новейших кристаллов для спин-волновой электроники и прорывной, меняющей мир изотопной цифры.

Взамен трёх бесперспективных последовательных Стратегий и Программы по импортозамещению подготовлены Проект КЦП (пока для Росатома), а в ближайшей перспективе (в течение 2–3 месяцев) будет подготовлен проект ФЦП по созданию экстремальной электроники, фотоники, фононики и спин-электроники для

создания «параллельной» мировой электронной индустрии с опережением зарубежного уровня, как указано выше, на 5–7 лет. Дело за малым – восприятием и пониманием проектной ФЦП на государственном уровне.

Вечно летающие дроны

Это проект «крылатой» доставки грузов, инструмента для МЧС, скорой медицинской помощи, агросектора, мониторинга городской среды, реализации локальных функций GPS, GSM и др.

Вследствие ухода из-за санкционного давления известной логистической почтовой службы DHL были рассмотрены варианты почтовой логистики на новой технологической основе (нет худа без добра). Был поднят с «пыльных полок» проект бывших школьников – десятиклассников физико-математического лицея № 38 г. Ульяновска Лали Нуриевой, Максима Сырова, Никиты Брескану – сегодняшних студентов московских вузов.

Проект под названием «Дрон на основе новой бортовой GaAs-электроники, не имеющей аналогов в мире» (рис. 1) имеет оригинальные перспективные научно-технические решения:

- дрон оснащён СВЧ-системой бесконтактной индукционной зарядки литиевых батарей (патент РФ, см. далее);
- предусматривается создание системы миллиметровой и субмиллиметровой локации, навигации, связи, не имеющей аналогов в мировой практике;
- оснащение бортовой сверхэнергоплотной силовой электроникой (IPM до 20 кВт/дм^3);
- СВЧ ВИП для бортовых терагерцевых цифровых систем (с плотностью до 100 кВт/дм^3) с высоким КПД;
- оснащение бортовым терагерцевым (бит/с) фотонно-фононным процессором;
- микроклимат для Li-батарей в условиях зимнего сезона;
- приборы ночного и теплового видения, в том числе в условиях «зелёнки» – днём и ночью;
- солнечная бортовая батарея с КПД от 28–30% (до 400 Вт/м^2);
- мультифазные асинхронные сверхлёгкие ВЧ-электродвигатели;
- наличие (кроме ТГц-радаров) сверхмалогабаритных видео- и ИК-камер обзора местности;
- SMART-дрон должен быть работоспособным при температуре окружающей среды до +200°С (МЧС), в перспективе до +400°С;
- SMART-дрон должен быть работоспособным в «чернобыльских условиях»;
- исполнение дрона – как квадрокоптер, как «летающее крыло» с меняющимся вектором тяги электродвигателя, в том числе с вертикальным взлётом;
- навигационная система – как спутниковая, так и маячковая (миллиметровая ориентация на бесконтактную зарядку);
- дрон должен иметь возможность летать на сверхнизких высотах (до 10 м от поверхности), а также совершать полёт на низкой высоте в условиях городской застройки;
- в дрон может быть встроена система, обеспечивающая локальное «кривое энергозеркало» («кривое» энергопространство в виде «молока» для радаров);
- дрон должен иметь проектную скорость до 500…600 км/час (на ВЧ асинхронных мультифазных электродвигателях).

Рис. 1. Рисунок smart-дрона из школьного проекта

Новое приборостроение («параллельная» радиационностойкая, гиперчастотная, высокотемпературная электроника)

ЭКБ для ключевых блоков и систем SMART-дрона. IPM асинхронный электропривод

Для пролёта на сверхнизких высотах дрон должен иметь ВЧ-привод, электронное (субмиллиметровое и ИК) зрение и мгновенную обработку логистики на бортовом суперкомпьютере с управлением через контроллер асинхронных двигателей.

Бортовые асинхронные сверхмалогабаритные ВЧ-электродвигатели (четыре в варианте квадрокоптера или три – в варианте «летающего крыла») должны иметь комплексное управление в системе: «электронное зрение» →препятствие →поражающие кинематические системы (ПЗРК) →цель с субсекундным манёвром.

Для этих целей выполняется бортовой микроконтроллер с силовым драйвером и силовыми ключами трёх- или мультифазного инвертора на i-GaAs изоляторе с удельным сопротивлением свыше 10^9 Ом/см. Технология исполнения: LPE + MOCVD + ALD, в том числе полностью реализованные реактивные интегральные элементы, включая оптическую развязку системы драйвер – ключ. ШИМ-модуляция в данном случае неуместна, поскольку она уже достаточно консервативна и не может обеспечить ВЧ-инвертирование.

Планируется ВЧ АЧМ с созданием «чистых» синусоид как с положительной, так и с отрицательной противофазными полуволнами с нулевой точкой.

Силовые ключи будут выполнены на основе неизвестных на мировом рынке:

- n- и p-канальных GaAs MOSFET (до 800 В), внеконкурентных даже по сравнению с Si COOL-MOSFET с рабочими частотами до 10 МГц;
- n- и p-канальных IGBT (частоты до 1,0 МГц) на 600 В;
- n- и p-комплементарных GaAs GTO с токами до 300 А/чип и напряжениями до 800 В, в том числе с оптическим управлением (сотни кГц, 600...800 В);
- а также на других решениях, которые не раскрываются.

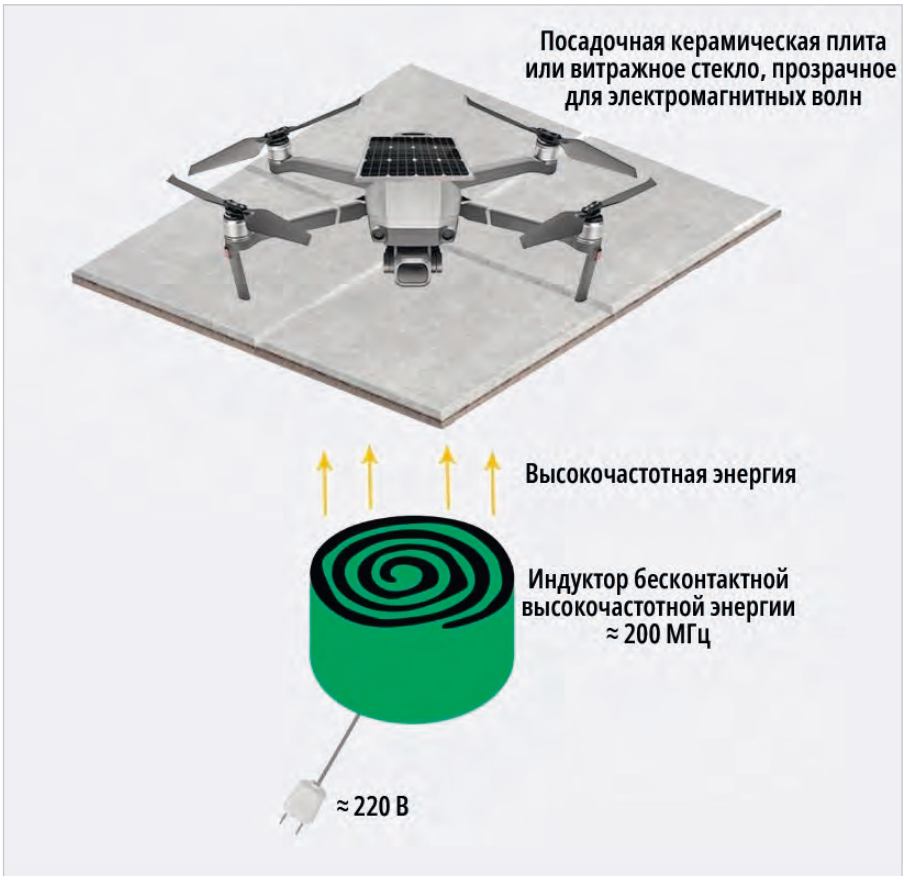


Рис. 2. Схематичное изображение бесконтактной зарядки по патенту д.т.н., профессора Севастопольского университета И.Б. Широкова (рисунок взят из школьного проекта)

Что касается диодов, то возможны «циклоидные», т.е. на квантово-магнитных точках GaAs SBD с $\tau_{гг}$ на порядок меньше, чем у SiC SBD (до 650...800 В, с $\tau_{гг} \approx 1{,}0$ нс).

Бортовой ВИП

Энергоплотность при $U_{DC\ вх.} = 200$ В до 15...20 кВт/дм^3, а при $U_{DC\ вх.}$ до 24 В энергоплотность СВЧ ВИП для СВЧ терагерцевых бортовых систем – свыше 100 кВт/дм^3. При этом добавляются новые силовые СВЧ полевые транзисторы и диоды на десятки ампер. Консервативность и бесполезность ШИМ-модуляции – нет смысла обсуждать (см. сообщение [4]).

Зарядное бесконтактное устройство

Это достаточно высоковольтная отечественная приёмо-передающая система, автором которой является профессор Севастопольского Государственного университета, д.т.н. Широков Игорь Борисович, который запатентовал исполнение СВЧ/ВЧ бесконтактного зарядного устройства (Патент RU2704602C1, приоритет от 10.12.2018). Для этой цели требуются мощные транзисторные ключи со сверхмалыми остаточными напряжениями, отдающие излучательную индукционную мощность 15...20 кВт/200 МГц/200 В.

Проблема решаема на мощных GaAs MOSFET с напряжением 400...600 В, работающих в импульсном режиме с длительностью меньше 0,1...0,5 мкс с мультифазным параллельным включением (режим «наложенной» скважности), т.е., по существу, это – индукционная ВЧ блок-плита с ВЧ-индуктором. Приёмные элементы в днище дрона также выполняются на мощных СВЧ MOSFET-ключах с так называемыми «циклоидными» GaAs SBD, где носители заряда движутся в твердотельно-вакуумном межфононном пространстве по спирали, избегая фононного или электронного рассеивания (улучшение подвижности электронов μn). Такие диоды будут выстраиваться на кристаллах GaAs с квантово-точечными магнитными центрами на основе атомов лантаноидной группы таблицы Менделеева. Дрон с бесконтактной зарядкой показан на рис. 2.

ИК-зрение (ночное, тепловое в «зелёнке»)

Физика, конструкция, основы были подробно изложены на XXV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения в Государственном научном центре Российской Федерации НПО «Орион» холдинга «Швабе» Госкорпорации Ростех 24 мая 2018 г. [5], а также в проекте в ФПИ года четыре назад по приборам ночного и теплового видения с массогабаритами не более 50 грамм, в том числе всепогодным, на порядок превосходящим по чувствительности и меньше на порядок по массогабаритным размерам в сравнении с тепловизорами типа «МТ-30», «М-ПРО ЩЕГОЛ», «XAVER-100» ООО «Меркурий-Про».

Функциональные физические основы новых GaAs-микроболометров на водородоподобных квантовых точках подробно изложены в публикации [6] и, конечно, в докладе автора.

Подчеркнём, что тепловое излучение человеческого тела может быть на дистанциях, аналогичных ИК – ночному видению, т.е. до нескольких километров, что создаёт предпосылки для создания SMART-дронов с широкими возможностями поиска в ночных условиях, когда можно будет рассмотреть мышь-полёвку с высоты нескольких километров. Особенно это важно для МЧС при поиске пропавших в тайге, в горах людей или в условиях стихийных бедствий.

Бортовые ТГц РЛС

Новые SMART-дроны должны обладать не только ИК ночным (короткое ИК) или тепловым видением (в окне прозрачности 8...14 мкм или в пределах 20...38 ТГц), но и на начальных терагерцевых частотах.

Для этой цели будут реализованы сверхмалогабаритные терагерцевые «диэлектрические» бортовые РЛС на частотах прозрачности атмосферы 5,0...7,5 ТГц (5000...7500 ГГц). Принципы построения таких терагерцевых РЛС просты и понятны, если внимательно ознакомиться с публикациями [7]. Частоты 5,0...7,5 ТГц обеспечивают видимость отдельного волоса на голове человека. Дальность такой радиолокации, а также 7G (GSM, GPS), не хуже, чем на волнах 1,25...1,06 мм (240...320 ГГц), при более простом и более надёжном фотонно-фононном исполнении.

Бортовой терагерцевый, со сверхнизким энергопотреблением фотонно-фононный суперкомпьютер

Для того чтобы SMART-дрон обладал возможностями всё видеть, слышать, распознавать (взамен нейросетей), обходить препятствия, летать как на метровых, так и на километровых высотах, выявлять «грязную» радиацию («грязные» изотопные бомбы), определять климатические условия, позиционироваться до долей миллиметра на местности, работать в зимних условиях и т.д., **нужен бортовой суперкомпьютер, который в системе бортового энергопотребления будет потреблять единицы процентов от ёмкости аккумулятора**. Как сделать такой бортовой компьютер – изложено в публикации [2].

Напомним, что многоядерный процессор такой фирмы, как TSMC (Тайвань), с точки зрения энергопотребления – эквивалент электроутюга, а для экзафлопсного суперкомпьютера на тайваньских микропроцессорах понадобится целый блок такой АЭС, как Балаковская.

«Параллельная» электроника для отечественных мини-спутников по типу «Кубсат» («CubeSat») и «Starlink»

CubeSat

CubeSat – мини-спутники, именуемые также наноспутниками, чаще всего имеют объём в 1,0 дм^3, но иногда имеют форму параллелепипеда с объёмом в 3,0 дм^3. Они предназначены как для научных исследований в ближнем, среднем космосе, так и для военных целей.

«Кубсаты» имеют бортовые источники питания от единиц ватт (Li-батареи в виде цилиндрических шайб), либо электрохимические элементы (до 100 Вт/ч), либо дополнительные источники в виде солнечной фотовольтаики на кремнии или поликремнии с КПД 6–16% (до 300 Вт), которая зависима от солнечной радиации в сторону ухудшения эффективности.

«Кубсаты» боятся нагрева от солнечной радиации и имеют специальную тепловую защиту на поверхности «куба» или «параллелепипеда». Работоспособность «кубсата» в случае остановки солнечных батарей – всего несколько недель, и затем они входят (падают) в атмосферу. Солнечные батареи резко увеличивают массу мини-спутника.

На борту «кубсата» имеются системы ориентации (телеметрии) на лазерном гироскопе, связная аппаратура в VHF, UHF, L, S, C, X-диапазонах. Имеются сантиметровые РЛС и GPS, бортовой компьютер, двигатели Холла (ионные двигатели на Kr-ионах для корректировки орбиты), чаще всего они выводятся на ближние орбиты (из-за экранирования ионосферой сантиметровых электромагнитных волн). При способности тяжёлых американских ракет выводить в космос свыше 100 тонн полезной нагрузки и при весе «CubeSat» ≈ 1,33 кг (или до 4 кг – параллелепипедного варианта) можно рассчитать, какой «рой» может быть запущен одной ракетой-носителем. В России «кубсаты» пока находятся на уровне «кружкового рукоделия» в некоторых вузах Москвы и Сибири.

Мини-спутники «Starlink»

В настоящее время на ближней космической орбите находится 3500 активных спутников «Starlink» талантливейшего человека, предпринимателя Илона Маска, которые фактически спасают от разгрома Украину и выявляют нашу технологическую отсталость в области космической связи, навигации и локации.

Спутники Илона Маска предоставляют автономный (без телевышек) доступ в высокоскоростной Интернет, которым пользуются в 45 странах (в диапазоне 5G – до 10 Гбит/с, а к 2030 году – в диапазоне 6G – до 100 Гбит/с). Широкополосность обеспечивается «эстафетной» последовательностью приёма/передачи.

За создание «Starlink» взялись многие страны мира – от Тайваня до Саудовской Аравии, не говоря уже о Японии, Корее, Индии, Китае, странах ЕС.

Борисов Ю.И., руководитель Роскосмоса, успокаивал нашу общественность и обещал построить два завода по выпуску мини-спутников к… 2025 году и заметной серией к 2030 году.

Кстати: в Воронеже, Ульяновске, Казани, Саратове пустуют огромные технологические площади.

Мини-спутники Илона Маска имеют вес от 200 кг (старое исполнение типа V1.5) до 830 кг (сверхмощный по возможностям широкополосного Интернета спутник V2 Mini).

Такие спутники обеспечивают также СВЧ цифровую связь в миллиметровом диапазоне вплоть до 1,0 мм (300 ГГц), недоступную пока для отечественных приёмников (необходимы субтерагерцевые АЦП, которых нет у нас даже в X-диапазоне). **Это опаснейший вызов для России**.

Самое настораживающее обстоятельство – это то, что с помощью «Starlink» упрощена схема управления беспилотниками, в том числе ударными, а также «Starlink» стал стержнем так называемой системы C4ISR (командование, управление, связь, компьютерная обработка, разведка, наблюдение, рекогносцировка). В этом смысле обладание такими возможностями в вооружённом столкновении в населённых пунктах имеет зачастую решающее значение, поскольку мобильная независимая цифровая связь, обмен видеоизображениями и сообщениями в режиме реального времени обеспечивают тактическую манёвренность, жизненно важную в условиях современной войны.

Энерговооружённость «Starlink» обеспечивается через солнечные панели (последний вариант имеет солнечные панели до 50 м^2) мощностью до 10 кВт.

Отметим, что мини-спутники типа «Starlink» в перспективе способны (с бортовыми 30-киловаттными мини-АЭС) «обнулить» возможности баллистических ракет с ядерным оружием уже к 2030 году – на принципах сверхмощного субмиллиметрового электромагнитного излучения и подавления бортовой электроники ядерных ракет ЭМИ-средствами, в том числе с ядерным самоподрывом в космосе (электромагнитные гигаваттные ЭМИ).

Поэтому важнейшей с точки зрения оборонных технологий является задача создания отечественной мощной группировки мини-спутников (по типу как «CubeSat», так и «Starlink»).

Квадрокоптеры DHL, логистическая и инфраструктурная урбанизация Москвы

В 2020 году на основе проектных решений школьников физико-математического лицея № 38 г. Ульяновска по созданию великолепных дронов с бесконтактной SMART-зарядкой бортовых батарей молодыми аспирантами МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МЭИ был подан проект по описанным в статье SMART-дронам на объявленный конкурс по созданию продвинутых дронов для Москвы. Проект почти дошёл до «финишной ленточки», но, видимо, что-то помешало – то ли пугающая экспертов новейшая бортовая GaAs-электроника, то ли традици-

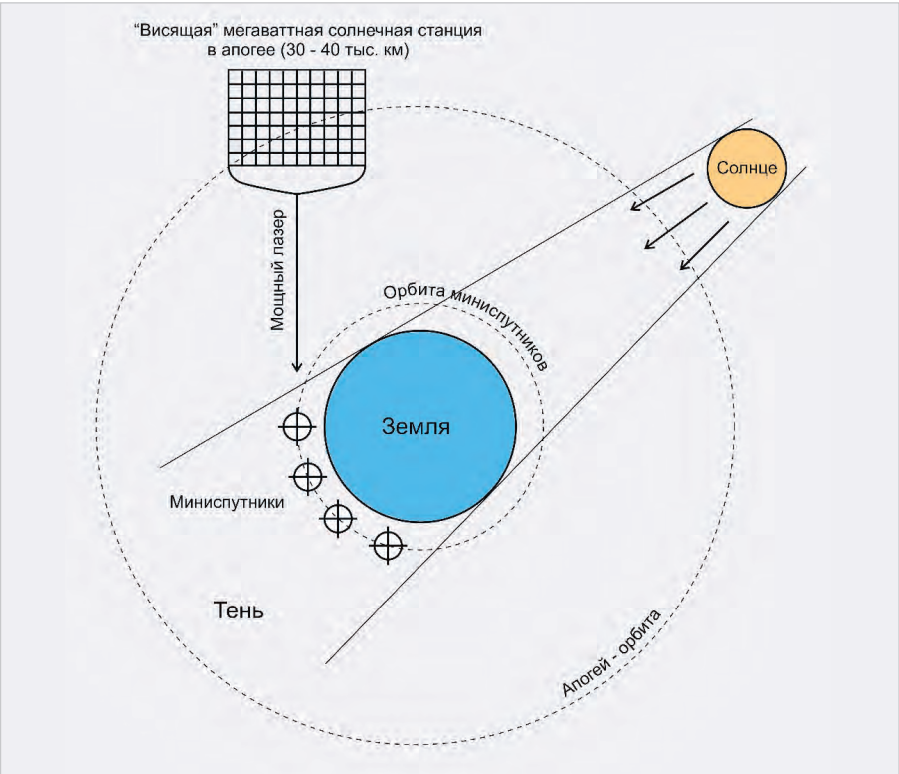


Рис. 3. Беспроводная энерголазерная теневая «подпитка» группировки мини-спутников с мощной бортовой солнечной станцией на апогейной орбите

онные закулисные договорные схемы – неизвестно. Но «вечно летающий» дрон пригодился бы мегаполису.

Что касается воздушной DHL, то такая идея имеет право на существование в виде дронов типа «летающее крыло» с тремя двигателями в носовой части и краевых областях крыльев с меняющимися векторами тяги. Расчёты Никиты Брескану показывают, что на примере квадрокоптера весом 10 кг дрон с бесконтактной подзарядкой будет иметь следующие параметры:

- полная масса – 10 кг;
- грузоподъёмность (полезная нагрузка) – 3,5 кг;
- серно-литиевый аккумулятор с ёмкостью свыше 1675 мА·ч;
- мощность двигателей – 1700 Вт (max 2205 Вт);
- максимальная скорость подъёма ($p \cdot t = mgh$) = 16,7 м/с;
- мощность солнечной панели – от 0,4 кВт/м^2 (GaAs);
- высота – от 1,0 км;
- сила тяги – 200 Н (при $\cos\alpha = 0{,}5$ тяга – 173 Н);
- предельная скорость – 26,8 м/с (при полезной нагрузке – 3,5 кг или 96,5 км/ч).

Подчеркнём, что расчёты выполнил десятиклассник.

С учётом новейшей элементной GaAs и «тринитридной» «параллельной» электронной базы, а также прогресса в разработках мультифазных асинхронных двигателей на килогерцовых частотах, **расчёты показывают, что можно утроить скорости ударных мини-беспилотников «Ланцет» Ростеха (т.е. довести до 650 ÷ 750 км/час) с радиусом действия как минимум 100 км** (при использовании бортовой силовой электроники с массой, на порядок меньшей, чем у «Ланцета», и резком снижении энергопотребления энергозатратных СВЧ и ТГц бортовых систем). При радарной малозаметности (пролёте на финишной стадии на высотах 5–10 м) такие «Ланцеты-М» могут иметь решающее значение в современной «беспилотной» войне.

Очень привлекательно выглядит воздушное DHL, например, между Москвой и Санкт-Петербургом, когда новый smart-дрон (внешне похожий на известный беспилотник «Герань») мог бы преодолеть расстояние до С.-Петербурга за 2,5–3 часа, имея зарядные станции через ≈ 100 км (при новых решениях) вдоль трассы М-11. Это, вероятно, очень важно в условиях скоростной доставки документов, денег, цветов, флешек, медпрепаратов и др.

«Параллельная» гиперчастотная, высокотемпературная, радиационностойкая электроника, фотоника и фононика, а также «комнатная» сверхпроводимость для «вечно летающих»* отечественных «CubeSat», «Starlink»

Функционально мини-спутники по типу «CubeSat» и «Starlink» (в том числе по проекту бывшей школьницы лицея № 2, г. Ульяновск, Ренаты Галимовой, студентки МГТУ им. Н.Э. Баумана) будут обеспечены сверхэнергоплотной СВЧ и терагерцевой электроникой, фотоникой и фононикой, включая бортовые 2-фотонные экзафлопсные суперкомпьютеры (со сверхнизким энергопотреблением).

Подчеркнём, что в ТГц-диапазоне, в частности, связь, навигация, телеметрия, локация невозможны на полупроводниковых приборах и СБИС ввиду огромного времени дрейфового пролёта в активных областях транзисторов и диодов, по сравнению со световыми разница достигает до трёх порядков (в 1000 раз). Поэтому на смену зонной (полупроводниковой) теории приходит релятивистский («световой») транспорт электромагнитной энергии (твёрдовакуумная электродинамика).

Функциональные возможности будущих отечественных мини-спутников – это, конечно же, широкополосный Интернет 6G к 2030 году и 7G к 2035 году, а также естественный обзор поверхности земли с разрешающей способностью, обеспечивающей возможность видеть комара (!), а также, конечно, выполнение МЧС и боевых функций.

Что касается «вечно летающих» свойств, то в проекте Ренаты Галимовой «Новая отечественная электроника и материалы для повышения энергоресурса интернет-мини-спутников» показана генерация солнечной энергии на мини-спутниках (рис. 3).

Такая генерация и бесконтактная ретрансляция энергии мини-спутниками осуществляется на основе заявки на изобретение РФ, поданной в Роспатент в начале текущего года (ООО «АГАТ»,

*Под «вечно летающими» мини-спутниками необходимо понимать функционирование в течение четверти века «кубсатов» и «старлинков» на плазменной «подвеске» ионосферы и, конечно, живучесть LPE GaAs солнечных батарей в условиях протонной радиации космических лучей.

г. Москва), на так называемых n-i-p («ниппель») LPE GaAs эпитаксиальных структурах. Такие структуры выступают как в роли фотоприёмников и преобразователей солнечной энергии (в космосе до 1600 Вт/м^2), так и в роли объёмных мощных ИК-лазеров на границе ИК и красного диапазона световых волн. Также данный метод приёма/передачи энергии в космосе может быть использован с помощью фотовольтаидных электростанций на более высоких орбитах. (Китай планирует создать солнечные электростанции мегаваттного уровня на апогейных орбитах в магнитосфере Земли.)

Что касается «магнитной подвески», то из физики известно, что при прохождении через проводник с круговым контуром (катушка Гаусса, внутри которой плазма, допустим, плазма ионосферы) возникает притягивающая или отталкивающая сила, действующая как на плазму, так и на проводник пропорционально IH/C, где I – ток в проводнике, H – сила наведённого магнитного поля, а C – скорость света.

Поскольку скорость спутника как минимум первая космическая (от 7 км/с), то градиент концентрации плазмы, допустим, в первом ионосферном слое может оказаться очень высоким, что создаст условия «комплексной» составляющей наведённой плотности плазмы (магнитное поле Земли – достаточно слабое, но и его влияние может быть учтено).

При стратосферной орбите вокруг мини-спутника появится очень плотная окружающая плазма, она очень подходит для создания «подушки непотопляемости» мини-спутника. Проблема? Конечно же, бортовая температура, поскольку Si, SiC (кстати, нерадиационностойкие SiC MOSFET), а также GaN-электроника – попросту выгорят. Вот здесь и понадобится высокотемпературная, радиационностойкая электроника, в том числе сверхпроводящая фотоника, фононика на основе новейших уникальных материалов $A_{III}B_{IV}$, $A_{IV}B_{IV}/A_{IV}$, которые осваиваются в периметре РАН (г. Санкт-Петербург) [8], [9] и Росатома, с температурой эксплуатации окружающей среды 250…450°C.

В отечественных мини-спутниках, так же как и у Илона Маска, будут использованы двигатели Холла на ионах криптона (Kr), но на совершенно новой технологической основе, с предварительной УФ-камерой ионизации криптона (в ближнем ультрафиолете на волнах λ = 240…320 нанометров на УФ-диодах д.ф.-м.н. С.А. Кукушкина (ИПМаш РАН, г. С.-Петербург)) в сверхсильных полях с использованием силовых преобразователей по типу озонаторов на Si-тиристорных преобразователях, работающих со скоростями тока di/dt ~ 10^{12} A/c на лазерных GaAs высоковольтных тиристорных (десятки киловольт) оптостолбах. Тиристорные оптостолбы также исключительно полезны и удобны для магнитно-полевой ускорительно-ионной установки сопла двигателя Холла со значительно более высокой ионной тягой, чем в мини-спутниках «Starlink» Илона Маска.

Особое значение имеет резкое усиление тяги ионного двигателя с применением сверхсильного магнитного поля на сверхпроводниковых структурах С.А. Кукушкина на основе электронной жидкости в нанослоевой системе 3C/2H-SiC/Si (комнатная сверхпроводимость!).

Заключение

1. В статье показана вероятность создания «параллельной» электроники в России (возможно, в Росатоме) на фоне «пути в никуда» на основе текущих Стратегий, Программ, импортозамещения, Концепций и прочих инициатив в отечественной электронике.

2. Статья ещё раз подчёркивает (наряду с предшествующими публикациями в журнале «Современная электроника» [1], [2] и другими), что у России в области ультрасовременной электроники опережающего уровня имеются такие возможности, которые и не снились в странах G7. Возникает вопрос – а кто препятствовал проектам по LPE GaAs и «тринитридным» технологиям д.ф.-м.н. С.А. Кукушкина (ИПМаш РАН, г. С.-Петербург)? Кто «убивал» эти проекты? Россия генетически не может обойтись без лысенковщины, несмотря на то, что создана платформа для прорывных технологических направлений по LPE GaAs, тринитридной и атомно-замещённой технологиям, опережающим мировой уровень как минимум на пять лет.

3. Вечно летающие SMART мини-спутники – это абсолютно необходимый элемент государственной безопасности. Ультрасовременные космические технологии – это основа основ сохранения национального суверенитета.

4. 7G на базе широкополосного космического Интернета – это цифровая экономика уже в четвёртом десятилетии, включая систему распознавания (но только не на «тупиковых» нейросетях).

5. «Крылатая» DHL, логистическая и инфраструктурная урбанизация, начиная с мегаполисов, с переходом на всю территорию РФ, включая в перспективе и электрический воздушный транспорт, – неплохая новая часть «интеллектуализации» терагерцевой биосреды обитания человека.

6. Новые дроны – мощный антитеррористический инструмент.

7. Надеемся, что новая статья заинтересует топ-менеджеров: в части дронов – А.Р. Белоусова, в части мини-спутников – Ю.И. Борисова, а также С.В. Чемезова.

Литература

1. *Гордеев А.И., Войтович В.Е., Святец Г.В.* Крупнейшие в мире перспективные электронные отечественные проекты с ёмкостью мирового рынка в триллионы долларов // Современная электроника. 2022. № 9.
2. *Гордеев А.И., Войтович В.Е., Святец Г.В.* Перспективные фотонные и фононные отечественные технологии для терагерцевых микропроцессоров, ОЗУ и интерфейса с сверхнизким энергопотреблением // Современная электроника. 2022. № 2.
3. *Гордеев А.И.* Как завоевать мировой рынок электроники в посткремниевую эпоху? // Современная электроника. 2021. № 5.
4. Комплексные полупроводники критически важны для ожидаемого всплеска спроса на 5G в миллиметровом диапазоне // Телеграмм-канал RUSMicro // URL: https://t.me/s/RUSmicro. (Источник: “Compound semiconductor critical to expected 5G mmWave demand spurt” URL: https://www.digitimes.com/news/a20230317PD207/5g-compound-semiconductor-mmwave.html)
5. Материалы XXV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения в Государственном научном центре Российской Федерации НПО «Орион» холдинга «Швабе» Госкорпорации Ростех 24 мая 2018 г.
6. *Войтович В.Е., Гордеев А.И., Звонарев А.В.* Терагерцевая тепловольтаика на основе монокристаллов LPE i-GaAs (SiO). В 2 ч. // Современная электроника. 2017. № 3, № 4.
7. *Гордеев А.И.* Перспективные терагерцевые поляризованные информационные системы в 2 ч. // Современная электроника. 2016. № 6, № 7.
8. *Кукушкин С.А., Осипов А.В.* Эпитаксиальный карбид кремния на кремнии. Метод согласованного замещения атомов (обзор) // Журнал общей химии. 2022. Т. 92. № 4. С. 547–577.
9. *Кукушкин С.А., Осипов А.В.* Оптические свойства, зонная структура и проводимость межфазной границы раздела гетероструктуры 3C-SiC(111)/Si(111), выращенной методом замещения атомов // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46, вып. 22.

Инновации электронных медицинских технологий из мирового опыта 2023 года

Надежда Любимая

Какой должна быть современная медицинская информационная система – об этом специалисты смежных областей, среди которых локомотивная роль закреплена за разработчиками РЭА, ибо медицина немыслима без современной электроники, размышляют всё чаще. Тренд новейшего времени – качественная диагностика в формате телемедицинских технологий – для развития требует электронных устройств с высоким уровнем ИИ, и они не замедлили появиться. Наш корреспондент зарегистрировался и виртуально посетил выставку медицинских технологий 26–29 марта 2023 г. в Нэшвилле (шт. Теннесси, США). Уместно проанализировать новейшие разработки на стыке современной электроники и медицины.

Возможности дистанционной диагностики

Несмотря на ограничения и неясность пока в возможностях приобретения новейших зарубежных медицинских технологий, мы не лишены возможности проводить мониторинг и анализ новейших разработок коллег во всём мире с тем, чтобы совершенствовать отечественные разработки в области современной электроники или создавать новые для пользы отечественной медицины и пациентов. Сегодня только ленивый или далёкий от рассматриваемой сферы идей и технологий не видит набирающий популярность тренд телемедицины. Да, он пока небезупречен, этот тренд дистанционной диагностики, и напоминает коллаж из 90-х гг. XX века, когда «выдающиеся психотерапевты» А. Чумак, А. Кашпировский (и др.), выступая по телевидению и очно, «заряжали» воду, объявляя её «целебной от всяческих болезней». Однако идея телемедицины изначально не была плохой, а вот о её практическом применении и инструментарии, разумеется, можно дискутировать и совершенствовать. В связи с этой темой в России становятся логичны и понятны недавние инициативы правительства о создании (упорядочении) единого реестра дипломированных специалистов, оказывающих психологическую помощь; напомним, что есть существенная разница между психологом, психотерапевтом и психоаналитиком. Несмотря на то что как к означенным специалистам, так и к телемедицине сохраняется в стране некоторое недоверие, от технологического прогресса не уйти никому, тем более когда административными мерами – регламентированно и обоснованно – в России станут вводить дистанционную диагностику в таких общих медицинских областях, как семейная медицина или общая терапия. А это уже начали делать. Понятно, что невозможна (пока) дистанционная деятельность врача анестезиолога-реаниматолога или, скажем, хирурга. Но что касается терапевтов, нагрузка на которых в медицинских учреждениях традиционно велика (основное направление общей медицины), тут уже есть практические наработки (требующие совершенствования), заложенные во время пандемии коронавируса COVID-19 [7]. Тогда, чтобы исключить избыточное общение людей в общественных местах, подчас в автоматизированном варианте начали применять технологию дистанционной диагностики и рекомендаций: заболевший пациент оставался дома, замерял температуру и передавал данные оператору по телефону, а в ответ получал рекомендации от квалифицированного медицинского персонала. Технология эта изобретена не в России, и, к сожалению, как первенство, так и совершенствование технологий пока не за нами, однако при грамотном подходе, да с участием отечественных разработчиков современной медицинской электронной техники ситуация может измениться. Одна из проблем пока в том, что собственного производства в России устройств, представленных на резонансной мартовской выставке в США, в конвейерном исполнении нет, и непонятно, как их заполучить в условиях известных санкций. Но, наверное, возможно и такое.

Итак, мероприятие, посвящённое инновациям в области ИТ в сфере цифрового здравоохранения и трансформации бизнеса, имело название ViVE2023, и там презентовались разработки новаторов в области здравоохранения – разные стартапы, связанные темой опыта сохранения здоровья и традиций ЗОЖ [4]. Особо стоит отметить павильон кибербезопасности, к нему было привлечено внимание отраслевых производителей, экспертов и заказчиков – потребителей соответствующих услуг. В отраслях «фармацевтика, медицина, здравоохранение» в павильоне 702 компания TytoCare (Нью-Йорк) представила разработанное ею по собственной технологии электронное устройство Tyto Insights для дистанционного диагностического анализа медицинских данных, в том числе лёгочных звуков с анализом хрипов, презентованное в марте 2023 года согласно пресс-релизу фирмы [3] и [6].

Технология Tyto Insights создана с участием ИИ и представляет собой специализированное аппаратно-программное решение, расширяющее диагностические возможности медицинских работников. Приложение (ПО, доступное для большинства моделей современных смартфонов) рассчитано для применения в том числе в составе телемедицинских платформ и в ситуациях, когда оценка состояния пациента производится удалённо на основе информации от различных «интеллектуальных» устройств и датчиков. Это особенно важно для оперативной диагностики состояния пациента, в том числе для детей в возрасте от двух лет. Устройство для многофакторного медицинского анализа по технологии Tyto Insights представлено на рис. 1.

Рассматриваемое устройство с конкретным функционалом позиционируется как первое в мировой истории и отрасли здравоохранения комплексное модульное устройство – платформа для проведения дистанционных медицин-

Рис. 1. Варианты устройства с различными насадками и на фоне смартфона (в комплект не входит) для многофакторного медицинского анализа по технологии Tyto Insights

Рис. 2. Внешний вид электронного модуля видеоконтроля, состояния и температуры зева

Рис. 3. Иллюстрация практической диагностики зева ребёнка. Представлена в [1]

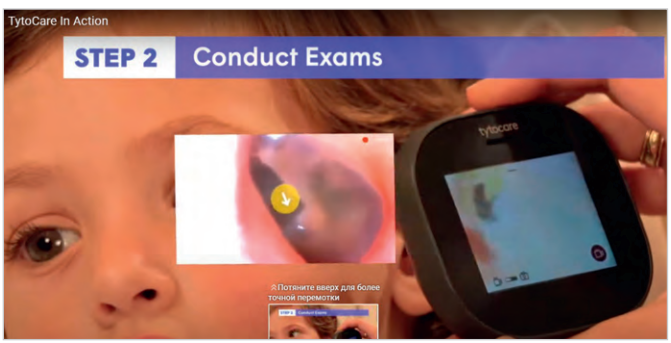


Рис. 4. Иллюстрация практической диагностики уха ребёнка. Представлена в [1]

ских осмотров с использованием искусственного интеллекта, соответствующее требованиям сертификата CE. Этот сертификат одобрен регулятором CE Mark, что даёт право специалистам на практическое применение устройства в медицинской сфере, а компании – на его серийное производство. Компания, специализирующаяся на услугах телемедицины с ИИ для преобразования первичной медико-санитарной помощи, работающая с системами здравоохранения с 2012 года, имеет партнёров в США, Европе, Азии, Латинской Америке и Израиле. В основе описанных новейших разработок результаты исследований в сотрудничестве с опытными пульмонологами и врачами общей практики, что позволило создать большую электронную базу симптомов, звуков, хрипов и пр. для сравнительной диагностики. Портативный диагностический электронный набор компании TytoCare, одобренный маркировкой CE и FDA, в перспективе позволяет выполнять всесторонние физические исследования сердца, кожи, ушей, горла, брюшной полости и лёгких, измерять частоту сердечных сокращений, температуру тела и уровень кислорода в крови; все эти данные являются ключевыми для корректной диагностики и назначения медицинского лечения, в том числе в стадиях острых фаз и хронических состояний. Это позволяет медицинским работникам получать корректные клинические данные мониторинга в формате общения с пациентом (или родственником пациента), по телефону или Интернету уточнять состояние, анамнез и нозологию заболевания, вести электронную карту больного, назначать лечение и притом избегать избыточных личных посещений. Высокоинтегрированная и простая в использовании программная система работает следующим образом.

Нуждающийся в помощи пациент или его родственник включает электронное устройство Tyto Insights, дистанционно по каналу беспроводной связи Bluetooth или Wi-Fi (возможны оба варианта) подключает его к смартфону, включает на сенсорной панели устройства нужный режим и подсоединяет к универсальному разъёму необходимый модуль, к примеру, для осмотра горла и зева при жалобах в специализации отоларинголога (рис. 2).

Затем активирует режим считывания данных с передачей информации в виде электронного файла на смартфон. После идентификации в системе пациент связывается через видеозвонок (в том числе в системе мессенджера) с дипломированным врачом общей практики или врачом-специалистом, подключённым к системе дистанционной диагностики (вариант – семейным врачом), поясняет ситуацию, отвечает на вопросы, пересылает файл с данными диагностики с помощью смартфона или планшетного компьютера, уточняет необходимые сведения и далее следует рекомендациям врача. Если необходимо повторное дистанционное исследование с помощью электронной системы – задействует её снова в тех режимах (включая измерение температуры тела или частоты сердечного ритма), какие необходимы по ситуации. Это иллюстрирует рис. 3.

В качестве примера на рис. 4 представлена диагностика состояния ушной раковины и уха по аналогичной методике, а на рис. 5 представлена иллюстрация дистанционного общения с передачей файла врачу-специалисту.

По той же схеме проводится диагностическое обследование других важных органов человека – с применением

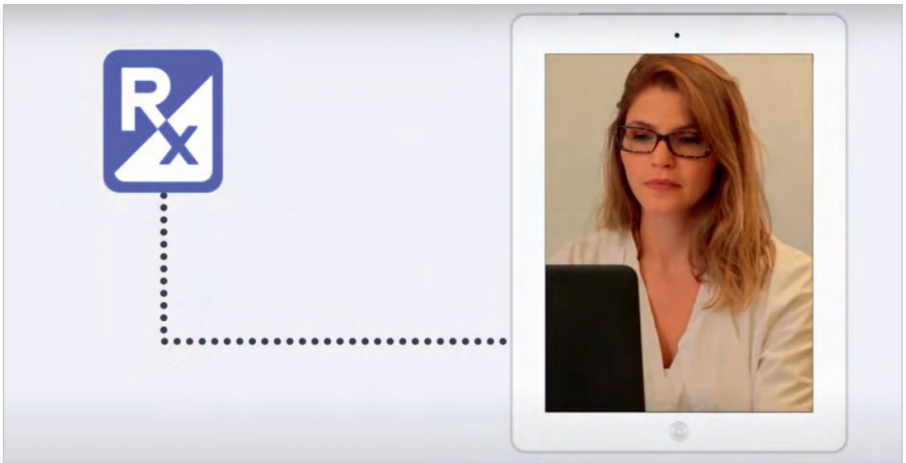


Рис. 5. Схема (иллюстрация) дистанционного общения с передачей файла врачу-специалисту

Рис. 6. Внешний вид электронного модуля стетоскопа

Рис. 7. Кардиомонитор Zio XT

соответствующего модуля – расширения устройства, разработанного в TytoCare. Как сказано в пресс-релизе, разработанная TytoCare технология анализатора звуков в лёгких представляет новые возможности дипломированным терапевтам, в том числе в клинических медицинских учреждениях. «На основе искусственного интеллекта во время удалённых обследований теперь можно решить на 59% больше проблем относительно ранее принятых возможностей диагностики с помощью аудио- и видеорешения для телемедицины, что приведёт к снижению стоимости лечения пациентов в среднем на 10%» [6]. Кроме сказанного, теперь контролю доступны звуки лёгких, записанные при помощи стетоскопа портативного устройства удалённого обследования TytoCare. Чтобы исключить подозрение на болезнь лёгких и сердца, теперь дистанционно определяют специфический аномальный звук в лёгких и тоны сердца, можно уточнить, обнаружены ли хрипы, и какие именно. Улучшились возможности долгосрочной медицинской помощи при хронических состояниях, многие из которых являются респираторными по своей природе. Респираторные диагнозы составляют более 40% всех диагнозов и нозологий на протяжении нескольких столетий, как правило, при отсутствии осложнений они не приводят к летальному исходу, тем не менее с новыми возможностями теперь выявляют на ранних стадиях даже астму.

Функционал электронной диагностической лаборатории состоит из нескольких модулей и элементов. Для считывания данных и записи в память устройства лёгочных звуков и тонов сердца, а также связанных с ними симптомов и показателей жизнедеятельности служит портативный стетоскоп, представленный на рис. 6.

Tyto Lung Sounds Analyzer – вебмодуль ПО, добавляющий возможности к существующему решению TytoCare, предназначенный для помощи в клинической оценке данных аускультативных звуков лёгких путём анализа записанных лёгочных звуков – для качественной диагностики респираторных заболевания удалённо. Так, автономное ПО создано для поддержки устройства SaMD (программное обеспечение как медицинское устройство), предназначенного для информирования медицинских работников о присутствии аномального звука дыхания – хрипы у взрослых и детей. Полученные показания анализируются с применением обширной базы данных, содержащей звуки лёгких и сердца, а также информацию о симптомах заболеваний и показателях жизнедеятельности организма. Алгоритмы анализа лёгочных звуков (Wheeze Detection) преобразованы в крупнейшую и уникальную в своём роде «базу данных лёгочных звуков» – для сравнения. Всё это способствует неотложной помощи и управлению хроническими заболеваниями на дому. Так, алгоритм обнаружения хрипов в лёгких человека расширяет существующие интеллектуальные диагностические возможности, заполняя пробелы в качестве, ранее имевшие место в телемедицине, и даже разрешает проблемы, вызванные возможной нехваткой (кадровым голодом на местах) медицинских работников. При выявлении хрипов применяются ИИ-алгоритмы. Это помогает врачам дистанционно ставить обоснованные и точные диагнозы, а также назначать необходимое лечение. Демонстрационное видео инновационной разработки представлено в [1]. Дополнительные отличительные особенности – это широкие возможности видеообследования в режиме реального времени, облачное хранилище данных с аналитикой, встроенная технология считывания данных медицинских датчиков и алгоритмы машинного обучения

для обеспечения правильности применения модуля диагностики пациентами или родственниками на местах и понимание эксплуатационных возможностей – для медицинских работников. Эта инновационная разработка в системе телемедицинской диагностики позволяет дипломированным врачам максимально точно (корректно) диагностировать разные заболевания удалённо, оказывая виртуальную первичную помощь на дому с помощью Home Smart Clinic («домашней умной клиники»). Home Smart Clinic от TytoCare получила одобрение Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA). В основе системы всё то же портативное устройство для удалённого обследования TytoCare с поддержкой ИИ для интеллектуальной диагностики Tyto Insights, а также лаборатория Tyto Engagement Lab с возможностями настройки для конкретной высококачественной и доступной виртуальной помощи. В домашних условиях это позволяет соблюсти необходимые требования по сохранению здоровья посредством рекомендаций дипломированных врачей, полученных дистанционным способом по телефону или Интернету – в ответ на переданные медицинские данные о состоянии пациента.

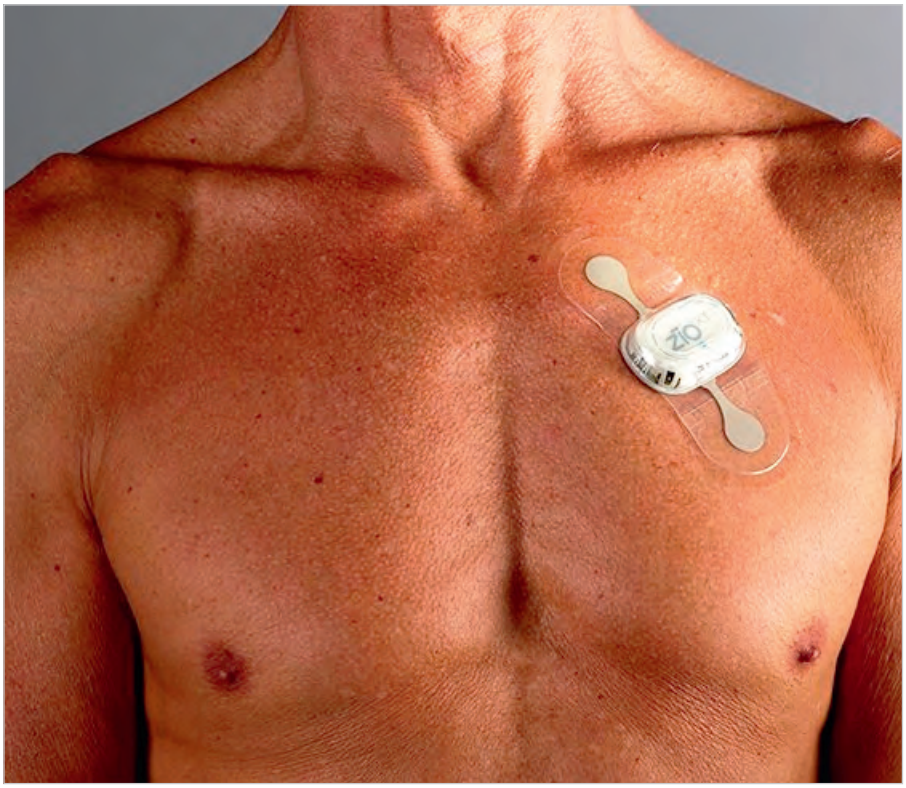


Рис. 8. Иллюстрация кардиомонитора Zio XT во время диагностического обследования

Из других новостей мартовской выставки 2023 года по той же теме

Компания TGH Imaging Powered by Tower первой во Флориде установила цифровую систему ПЭТ/КТ Omni Legend от GE HealthCare. Компания InventHelp Inventor (Мэрисвилль, шт. Вашингтон), разработала индикатор боли с маркировкой PDK-328, а также электронный диагностический комплекс модели FED-2431 для неинвазивного мониторинга уровня глюкозы. Это позволяет контролировать уровень глюкозы в крови человека без необходимости забора образца даже капли крови. В той же области «фармацевтика, медицина, здравоохранение» в марте 2023 года на ежегодном Конгрессе Американской ассоциации кардиологов (ACC) компания iRhythm Technologies презентовала новинку – носимый кардиомонитор Zio XT, функционирующий эффективнее и быстрее аналогичных устройств.

Кардиомонитор Zio XT

Zio XT – одноразовый портативный аппарат, рассчитанный для применения как при стационарном, так и при амбулаторном лечении. Устройство относится к кардиомониторам длительного действия (LTCM) [2]. Устройство Zio XT на протяжении 14-дневного периода работы в автономном режиме способно регистрировать 99% случаев аритмии, тогда как холтеровский монитор за двое суток фиксирует только 47% подобных событий. Zio XT имеет небольшие размеры и вес, некритичен к обездвиживанию электродов, следовательно, создаёт меньше дискомфорта для пациентов во время ношения [2]. Считанные в реальном режиме времени данные выгружаются в ПК после окончания диагностических процедур. Внешний вид кардиомонитора Zio XT представлен на рис. 7.

Врачи применяют несколько вариантов мониторинга сердечного ритма. Одноразовые носимые мониторы Zio относительно точны и дёшевы, но «холтеровское мониторирование» с мобильной телеметрией сердечного ритма и амбулаторные мониторы событий, конкурирующие с LTCM (производители BioTelemetry от Philips, Preventice Solutions от Boston Scientific и Bardy Diagnostics от Baxter), всё ещё дают более корректную картину обследования. Тем не менее пользователи Zio XT отмечают более высокий диагностический результат, чем у других устройств LTCM, и более низкую частоту повторных тестов в течение 180 дней. На рис. 8 представлен вид кардиомонитора Zio XT во время диагностического обследования.

Статистике, пожалуй, можно верить, ибо для сравнения эффективности различных вариантов исследователи проанализировали данные о почти 288 тысячах пациентов, получивших амбулаторные кардиомониторы в 2017–2021 гг. Об этом сказано в [5]. Там же утверждается, что «другие LTCM на 20% реже выявляли конкретную аритмию и в 3,5 раза чаще требовали повторного тестирования в течение 180 дней.

Перспективы и выводы

Дистанционными технологиями в сфере медицинского консультирования пользовались и ранее. Во времена неустойчивого психологического фона люди с медицинскими компетенциями становятся популярны, а методы работы можно подстроить под конкретные возможности. Дело не новое, «новые» в нём технические механизмы контента и, возможно, популярность индивидуального консультирования, в отличие от массового телегипноза 90-х. С начала 2020 года была видна устойчивая тенденция по дистанционному медицинскому консультированию. Но есть чисто российские нюансы развития этого рынка. Число дипломированных и признанных в научном сообществе специалистов, экспертов как было, так и есть – их число заметно не изменяется, однако по основным объективным экономическим законам рынка в аспектах спроса, предложения, стоимости услуги и инструментов рынка, в ответ на вызовы времени появляются «спецы», не обладающие высокой квалификацией или нуждающиеся в обновлении знаний, совершенствовании работы. Эти «тоже специалисты» могут в кратко- и среднесрочной перспективе (пока реноме их не будет оспорено результатами деятельности) демпинговыми ценами на услуги нивелировать значение, пользу дипломированных и опытных докторов, условно подрывать веру в профессию. Поэтому крайне важно вместе с введением в оборот электронных устройств-помощников для медицинской диагностики разрабатывать также и правовое поле, и чёткие алгоритмы взаимосвязи устройств наподобие компании Tyto Care с конкретным медицинским учреждением и персоналом. Да, при внешних ограничениях личных контактов медицинское консультирование развивается в дистанционной форме. Но в странах, где (на примере рассмотренных в статье) правовое поле для применения телемедицины апробировано и стабильно, где на фоне страхов и тревог завтрашнего дня люди ожидают рост отрасли и дивиденды – это уже оправдано. На спрос реагируют предложением. Развиваются маркетплейсы медицинских специалистов, направление дистанционных консультаций развивается. В России с этим пока сложно. Но есть и тут перспектива. Дистанционную диагностику с помощью рассмотренных средств современной электроники можно осуществлять в условиях не только пандемии, но и невозможности посещения медицинского учреждения. Такую диагностику может осуществить комбатант, участвующий в военной операции (и полагаю, это будет очень востребовано), или геолог, находящийся далеко от медицинской инфраструктуры и условной цивилизации, в тундре, в горах, то есть везде, где рядом нет дипломированного медицинского работника, но есть хоть какая-то цифровая связь с миром.

Из сказанного можно сделать условно три промежуточных вывода. Во-первых, устройство будет востребовано в мире, в том числе в России, в рамках всё того же направления телемедицины. В период активной фазы пандемии коронавируса профильным специалистам его очень не хватало; автор в то время сам работал в области обеспечения здоровья граждан и с коллегами не только применял электронные средства диагностики, но и обеспечивал системы дистанционного общения с пациентами.

Во-вторых, несмотря на частичную корректировку требований российского законодательства в области оказания медицинских услуг, оно все ещё нуждается в совершенствовании в направлении развития телемедицины, особенно в части уточнения ответственности диагноста и его рекомендаций.

В-третьих, серийный выпуск и массовое применение нового устройства открывает перспективы поставщикам медицинских услуг в высвобождении части персонала, то есть в обеспечении ожидаемой рентабельности

инвестиций и улучшения статистических результатов в отношении здоровья пациентов.

TytoCare позиционируется как компания «виртуального медицинского ухода», обеспечивающая доступную и высококачественную первичную помощь на дому. Регламентированные решения в виде удалённых медицинских осмотров в условиях разовой, ежедневной или первичной медико-санитарной помощи могут быть адаптированы для многих целей и групп населения. На этот счёт в России уже заявлены инициативы контролировать дистанционно обязательный по требованиям ПДД и ГИБДД предрейсовый осмотр профессиональных водителей в организациях и учреждениях. Рассмотренное устройство вполне соответствует этой задаче – «видеокартинка» диагностируемого сотрудника, позволяющая его идентифицировать, замерять артериальное давление, частоту сокращений – сердечного ритма, возможен осмотр зева – все эти меры необходимы для исключения допуска к управлению транспортным средством нетрезвого водителя или сотрудника в состоянии иного типа опьянения, включая наркотическое. Если к рассмотренному устройству добавить функционал алкотестера, контроля сахара в крови и анализа опиатов, такой лаборатории поистине не будет цены. Не забудем, что данные поступают к оператору – дипломированному врачу в цифровом виде (лабораторная система адаптирована к смартфону и ПК), следовательно, все данные фиксируются в памяти устройства и легко верифицируются при необходимой проверке. Всё это делает такую диагностическую телеметрическую медицинскую систему «открытой платформой» к другим приложениям, датчикам и устройствам, легко к ней адаптируемым, и в целом предоставляет цифровой диагностике ещё бóльшие шансы на объективность, чем это было возможно с учётом человеческого фактора и возможных знакомств медперсонала с диагностируемым сотрудником на местах. Таким образом, диагностические системы с ИИ, в том числе в медицинской сфере, дают более корректный результат, что позволяет медицинскому персоналу и профильным организациям совершенствовать ключевые показатели эффективности работы, лечения недугов и безопасности допуска на объекты лиц, находящихся в неадекватном к требованиям профессиональной задачи и деятельности состоянии. Осталось только дождаться аналогичных по качеству и функционалу электронных устройств, созданных силой мысли отечественных разработчиков РЭА и желательно на отечественной элементной базе. С этим выводом посмотрим в «завтра» с оптимизмом.

Литература

1. Демонстрационное видео // URL: https://www.youtube.com/watch?v=S9MoyAmwd9Q&feature=youtu.be.
2. Кардиомонитор Zio XT // URL: https://zdrav.expert/a/725730.
3. Официальный сайт компании Tyto Care // URL: https://www.tytocare.com.
4. Официальный сайт выставки ViVe2023 // URL: https://www.viveevent.com/.
5. *Тейлор Н.* Кардиомонитор от iRhythm, борющийся с Boston Scientific за долю рынка // URL: https://www.medtechdive.com/news/irhythm-IRTC-BSX-cardiac-monitor-zio/644420/.
6. Устройство Tyto Insights // URL: https://zdrav.expert/a/725742.
7. Что такое «телемедицина» // URL: https://promdevelop.com/technologies/telemeditsina/.

ПЛИС фирмы Gowin Semiconductor: номенклатура, характеристики, разработка приложений

Часть 2. Средства аппаратной поддержки ПЛИС GOWIN

Павел Редькин

Предлагаемая статья содержит обзорные сведения по средствам аппаратной поддержки ПЛИС фирмы GOWIN Semiconductor Corp, предлагаемым на рынке как самой фирмой, так и сторонними производителями. Статья предназначена для разработчиков электронной аппаратуры на ПЛИС и студентов специальностей, связанных с цифровой электроникой.

1. Средства аппаратной поддержки ПЛИС GOWIN от производителя

Помимо, собственно, ПЛИС, фирма GOWIN Semiconductor Corp производит и предлагает на рынке широкую номенклатуру средств их аппаратной поддержки. Сводная информация об этих средствах представлена на сайте фирмы [1]. Это, прежде всего, отладочные платы (Development boards) и отладочные наборы (Development Kits), перечень и краткие характеристики которых приведены в табл. 1. Документация производителя (схема, руководство пользователя) каждой из перечисленных в таблице отладочных плат и наборов доступна по ссылкам на странице [1]. Как можно видеть из таблицы, линейка отладочных плат и наборов охватывает практически все серии ПЛИС семейств Little Bee и Arora, а каждая плата в линейке имеет свою специализацию. Так, плата DK_UAC2_GW1N-LV9LQ144C7I6_V2.0 ориентирована на разработку приложений, связанных с цифровой обработкой звука, платы DK_START_GW2A-LV18PG256C8I7_V2.0, DK_START_GW2A-LV55PG484C8I7_V1.3 – на разработку сетевых приложений, платы DK_GoAI_GW2AR-LV18QN88PC8I7_V1.1, DK_VIDEO_GW2A-LV18PG484C8I7_V1.2 – на разработку приложений, связанных с обработкой видео и графики, плата EVAL_pSRAM_GW1NR-LV4MG81C6I5_V1.1 предназначена для первоначального освоения работы с ПЛИС.

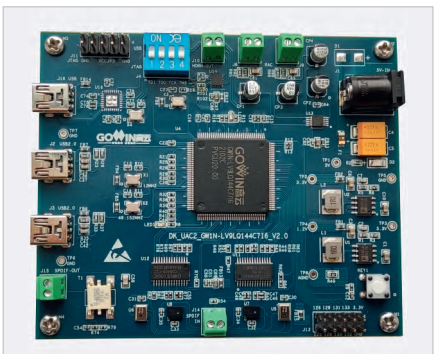


Рис. 1. Отладочная плата DK_UAC2_GW1N-LV9LQ144C7I6_V2.0

В качестве примера на рис. 1 показан внешний вид отладочной платы DK_UAC2_GW1N-LV9LQ144C7I6_V2.0 с установленной на ней ПЛИС GW1N-LV9LQ144.

Помимо отладочных плат, GOWIN предлагает также загрузочные кабели

Таблица 1. Отладочные платы (Developmentboards) и отладочные наборы (DevelopmentKits) от GOWIN

Название платы (набора)	Семейство ПЛИС, установленной на плате	Наименование ПЛИС, установленной на плате	Краткое описание платы: ресурсы и поддерживаемые интерфейсы
DK_UAC2_GW1N-LV9LQ144C7I6_V2.0	GW1N	GW1N-LV9LQ144	Плата продвинутого уровня, ориентированная на разработку аудиоприложений: • два интерфейса USB 2.0; • два микрофона MSM261S4030H0R с интерфейсом IIS; • два микрофона MSM261D4030H1CPM с интерфейсом IIC; • микросхемы CS8416-CZZR и CS8406-CZZR с поддержкой цифровой аудиосвязи SPDIF; • микросхема аудио-ЦАП CS4344-CZZR с поддержкой передачи цифрового стерео-аудио-сигнала; • микросхема оконечного аудиоусилителя MAX98357AETE+T; • три кварцевых генератора: 12 МГц, 49,152 МГц, 45,128 МГц; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 1,2 В; • загрузка конфигурации ПЛИС через JTAG; • пользовательские GPIO, светодиоды и пользовательские кнопки
DK_START_GW2AN-UV9XUG400C7I6_V1.0	GW2AN	GW2AN-UV9XUG400	Плата продвинутого уровня, ориентированная на разработку простых сетевых приложений: • микросхема промышленного Ethernet PHY, поддерживающая интерфейс Ethernet 10M/100M с разъёмом RJ45; • интерфейс USB 1.1, интерфейс USB 2.0, поддерживающий преобразование USB-Ethernet; • интерфейс SSPI; • кварцевый генератор 12 МГц; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 1,2 В; • загрузка конфигурации ПЛИС через JTAG; • пользовательские GPIO (32 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
DK_USB2.0_GW2AR-LV18QN88PC8I7_ GW1NSR-LV4CMG64PC7I6 _V3.0	GW2AR	GW2AR-LV8QN88PC8I7	Плата продвинутого уровня, ориентированная на разработку приложений широкого применения: • два интерфейса USB 2.0 (по одному на каждую ПЛИС); • к ПЛИС GW2AR-LV8QN88PC8I7 подключена микросхема Flash-памяти для хранения конфигурации; • два кварцевых генератора 12 МГц; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 1,8 В, 1,2 В, 1,0 В; • загрузка конфигурации обеих ПЛИС через JTAG; • пользовательские GPIO, светодиоды и пользовательские кнопки
	GW1NSR	GW1NSR-LV4CMG64PC7I6	

Название платы (набора)	Семейство ПЛИС, установленной на плате	Наименование ПЛИС, установленной на плате	Краткое описание платы: ресурсы и поддерживаемые интерфейсы
DK_START_GW1N-LV4LQ144C6I5_V1.1	GW1N	GW1N-LV4LQ144	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС: • интерфейсы LVDS (всего 40 линий); • к ПЛИС подключена микросхема SPI Flash-памяти объёмом 64 Мбит для хранения и загрузки конфигурации; • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • кварцевый генератор 50 МГц; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 2,5 В, 1,2 В; • пользовательские GPIO (72 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
DK_START_GW1N-LV9EQ144C6I5_V2.1	GW1N	GW1N-LV9EQ144	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС: • интерфейсы LVDS (5 дифференциальных пар LVDS – входы, 10 дифференциальных пар LVDS – выходы); • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 2,5 В, 1,2 В; • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • кварцевый генератор 50 МГц; • пользовательские GPIO (55 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
DK_START_GW1NR-LV9LQ144PC6I5_V3.1	GW1NR	GW1NR-LV9LQ144	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС: • интерфейсы LVDS (5 дифференциальных пар LVDS – входы, 10 дифференциальных пар LVDS – выходы); • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • кварцевый генератор 50 МГц; • пользовательские GPIO (55 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
DK_START_GW2A-LV18PG256C8I7_V2.0	GW2A	GW2A-LV18PG256	Плата продвинутого уровня, ориентированная на разработку сетевых приложений, требующих большого объёма памяти: • микросхема Flash-памяти ёмкостью 64 Мбит, с возможностью загрузки из неё конфигурации ПЛИС; • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 2,5 В, 1,5 В, 1,2 В, 1,0 В и 0,75 В (требуются для модуля памяти DDR3); • кварцевый генератор 50 МГц; • модуль памяти DDR3 SDRAM 2 Гбит; • два интерфейса Ethernet 10M/100M/1000M; • два разъёма RJ45 со встроенными трансформаторами; • интерфейс LVDS для приёма, включающий пять пар дифференциальных сигналов; • интерфейс LVDS для передачи, включающий пять пар дифференциальных сигналов; • слот для SD-карты; • пользовательские GPIO (40 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
DK_START_GW2A-LV55PG484C8I7_V1.3	GW2A	GW2A- LV55PG484	Плата весьма продвинутого уровня, ориентированная на разработку сетевых приложений, требующих большого объёма памяти: • микросхема Flash-памяти ёмкостью 64 Мбит с возможностью загрузки из неё конфигурации ПЛИС; • модуль памяти DDR3 SDRAM 2 Гбит; • два интерфейса Ethernet 10M/100M/1000M; • два разъёма RJ45 со встроенными трансформаторами; • кварцевый генератор 50 МГц; • интерфейс LVDS для приёма, включающий две пары дифференциальных сигналов; • интерфейс LVDS для передачи, включающий две пары дифференциальных сигналов; • слот для SD-карты; • микросхема интерфейса CAN, подключённого к ПЛИС через интерфейс UART; • модуль Wi-Fi, подключённый к ПЛИС через интерфейс SPI (скорость до 20 Мбит/с); • интерфейс MIPI CSI, включающий три пары дифференциальных сигналов, выведенных на отдельный 15-контактный FPC-разъём; • интерфейс MIPI DSI, включающий пять пар дифференциальных сигналов, выведенных на отдельный 30-контактный разъём; • микросхема интерфейсов АЦП/ЦАП (12-разрядный 8-канальный модуль ADC/DAC); • микросхема модуля часов реального времени RTC, подключённого к ПЛИС через интерфейс I2C, с собственным источником синхросигнала 32 768 Гц и с собственным автономным источником питания (литиевой батареей); • пользовательские GPIO (50 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
DK_START_GW2AR-LV18EQ144PC8I7_V1.1	GW2AR	GW2AR-LV18EQ144	Плата продвинутого уровня, ориентированная на разработку сетевых приложений: • два интерфейса Ethernet; • два разъёма RJ45 со встроенными трансформаторами; • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • микросхема Flash-памяти с возможностью загрузки из неё конфигурации ПЛИС; • кварцевый генератор 50 МГц; • интерфейс LVDS для приёма, включающий пять пар дифференциальных сигналов; • интерфейс LVDS для передачи, включающий пять пар дифференциальных сигналов; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 1,8 В, 1,0 В; • пользовательские GPIO (50 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
DK_START_GW1NZ-LV1FN32C6I5_V3.1	GW1NZ	GW1NZ-LV1FN32	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС: • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • микросхема преобразования цифровых уровней; • кварцевый генератор 50 МГц; • кварцевый генератор 12 МГц; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 1,8 В, 2,0 В; • пользовательские GPIO (17 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки

Название платы (набора)	Семейство ПЛИС, установленной на плате	Наименование ПЛИС, установленной на плате	Краткое описание платы: ресурсы и поддерживаемые интерфейсы
DK_START_GW1NS-LV4CQN48C7I6_V1.1	GW1NS	GW1NS-LV4CQN48	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС SoC: • установленная на плате ПЛИС является системой на кристалле (SoC), имеющей, помимо программируемой логики, встроенное аппаратное процессорное ядро Cortex-M3; • загрузка конфигурации ПЛИС и встроенного ПО процессорного ядра через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • загрузка/отладка встроенного ПО процессорного ядра через JTAG с помощью внешнего отладчика J-Link через выделенный разъём; • интерфейс LVDS для приёма, включающий пять пар дифференциальных сигналов; • интерфейс LVDS для передачи, включающий четыре пары дифференциальных сигналов; • микросхема SPI Flash-памяти объёмом 64 Мбит; • поддержка интерфейса RS-232; • разъём 9-pinRS-232; • кварцевый генератор 50 МГц; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 2,5 В, 1,8 В, 1,2 В; • пользовательские GPIO (3 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
DK_START_GW1NSR-LV4CQN48PC7I6_V1.1	GW1NSR	GW1NSR-LV4CQN48	Плата продвинутого уровня для освоения работы с ПЛИС SoC: • установленная на плате ПЛИС является системой на кристалле (SoC), имеющей, помимо программируемой логики, встроенное аппаратное процессорное ядро Cortex-M3, а также встроенную память PSRAM; • загрузка конфигурации ПЛИС и встроенного ПО процессорного ядра через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • загрузка/отладка встроенного ПО процессорного ядра через JTAG с помощью внешнего отладчика J-Link через выделенный разъём; • микросхема SPI Flash-памяти объёмом 64 Мбит; • интерфейс HDMI TX (4 пары выходов HDMI, 1 пара синхросигнала и 3 пары данных); • интерфейс видеокамеры (24-контактный разъём FPC); • микрофон; • акселерометр; • поддержка интерфейса RS-232; • разъём 9-pin RS-232; • кварцевый генератор 27 МГц; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 2,8 В, 2,5 В, 1,8 В, 1,2 В; • пользовательские светодиоды
DK_GoAI_GW2A-LV55PG484C8I7_V1.0	GW2A	GW2A-LV55PG484	Плата продвинутого уровня для сложных приложений со следующими предварительными характеристиками[1]: • установленная на плате ПЛИС имеет ёмкость 55KLUT и исполнение в корпусе 484BGA; • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • интерфейс видеокамеры OV2640 с разрешением 1600×1200; • микрофон SPH0645 с интерфейсом I2S; • микросхема LSM9DS1 IMU; • поддержка интерфейсов HDMI RX, TX; • микросхема Flash-памяти ёмкостью 32–64 Мбит; • пользовательские GPIO, светодиоды и пользовательские кнопки
DK_GoAI_GW2AR-LV18QN88PC8I7_V1.1	GW2AR	GW2AR-LV18QN88	Плата продвинутого уровня для приложений, связанных с обработкой видео и графики: • к ПЛИС подключена микросхема SPI Flash-памяти объёмом 64 Мбит для хранения и загрузки конфигурации; • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • интерфейс видеокамеры (разъём FPC); • кварцевый генератор 27 МГц; • интерфейс HDMI TX; • интерфейс HDMI RX; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 2,8 В, 2,5 В, 1,8 В, 1,2 В, 1,0 В; • пользовательские GPIO (3 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
DK_GoAI_GW1NSR-LV4CQN48PC7I6_V2.2	GW1NSR	GW1NSR-LV4CQN48	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС SoC: •установленная на плате ПЛИС является системой на кристалле (SoC), имеющей, помимо программируемой логики, встроенное аппаратное процессорное ядро Cortex-M3, а также встроенную память PSRAM; • загрузка конфигурации ПЛИС и встроенного ПО процессорного ядра через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • микросхема SPI Flash-памяти объёмом 64 Мбит; • интерфейс HDMI TX (4 пары выходов HDMI, 1 пара синхросигнала и 3 пары данных); • интерфейс видеокамеры (24-контактный разъём FPC); • кварцевый генератор 27 МГц; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 2,8 В, 2,5 В, 1,8 В, 1,2 В; • пользовательские кнопки, светодиоды
DK_VIDEO_GW2A-LV18PG484C8I7_V1.2	GW2A	GW2A-LV18PG484	Плата весьма продвинутого уровня для приложений, связанных с обработкой видео и графики: • модуль памяти DDR3 SDRAM объёмом 2 Гбит; • четыре интерфейса HDMI, два из которых используются для приёма сигналов (один принимает сигналы через микросхему декодирования ADV7611BSWZ, а другой принимает сигналы непосредственно через FPGA IP), а два других используются для передачи сигналов (один передаёт сигналы через микросхему декодирования ADV7513BSWZ, а другой передаёт сигналы непосредственно через FPGA IP); • интерфейсы LVDS TX, RX (один интерфейс LVDS для приёма, включающий десять пар дифференциальных сигналов, один интерфейс LVDS для передачи, включающий десять пар дифференциальных сигналов); • интерфейс MIPI CSI; • интерфейс MIPI DSI; • 15-контактный разъём FPC; • микросхема Flash-памяти ёмкостью 64 Мбит с возможностью загрузки из неё конфигурации ПЛИС; • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 2,5 В, 1,5 В, 1,2 В, 1,0 В и 0,75 В (требуются для модуля памяти DDR3); • кварцевый генератор 50 МГц; • пользовательские GPIO, светодиоды, ползунковые переключатели и пользовательские кнопки
EVAL_pSRAM_GW1NR-LV4MG81C6I5_V1.1	GW1NR	GW1NR-LV4MG81	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС: • загрузка конфигурации ПЛИС через JTAG; • цифровой семисегментный индикатор на четыре знакоместа; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 1,8 В, 1,2 В; • пользовательские GPIO, светодиоды и пользовательские кнопки

Название платы (набора)	Семейство ПЛИС, установленной на плате	Наименование ПЛИС, установленной на плате	Краткое описание платы: ресурсы и поддерживаемые интерфейсы
DK-BLE-CEIT-ASSEM	GW1NRF	GW1NRF-4	Комплект разработки начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС µSoC. Комплект состоит из мезонинного модуля BLE (GW1NRF-LV4MOD/CEIT), содержащего ПЛИС GW1NRF-4, а также базовой платы DK_BLUE_CARRIER_INIT. ПЛИС GW1NRF-4 является микросистемой на кристалле (µSoC), так как содержит в своём составе аппаратный приёмопередатчик Bluetooth Low Energy 5.0, а также аппаратное 32-разрядное процессорное ядро архитектуры ARC для хранения программного стека Bluetooth LE. Помимо этого, ПЛИС содержит 4,6К логических ячеек LUT FPGA. Мезонинный модуль GW1NRF-LV4MOD/CEIT, помимо ПЛИС, имеет дополнительную периферию, а также антенну для обмена через Bluetooth. Базовая плата DK_BLUE_CARRIER_INIT обеспечивает разделение ввода-вывода логической матрицы FPGA и процессорного ядра, светодиоды для индикации питания и состояния GPIO, а также устройство преобразования интерфейсов USB-JTAG FTDI FT232H для загрузки конфигурации ПЛИС

[1] Окончательные характеристики отладочной платы DK_GoAI_GW2A-LV55PG484C8I7_V1.0 на момент выхода статьи производителем не определены.

Таблица 2. Загрузочные кабели и программаторы для ПЛИС от GOWIN

Название	Краткое описание и характеристики
PL_USB_CABLE_V5.0	Загрузочный кабель для программирования ПЛИС GOWIN. Представляет собой подключаемый к ПК USB-кабель для внутрисхемной (online) загрузки файла конфигурации ПЛИС. Имеет невысокую стоимость и подходит для мелкосерийного и единичного производства. Особенности: • интерфейс с ПК – USB; • интерфейс с ПЛИС – JTAG
OL-Programmer-A_V3.0 (B-OP710-4)	Четырёхканальный промышленный offline-программатор ПЛИС GOWIN. Представляет собой подключаемый к ПК USB-кабель для загрузки файла конфигурации типа bitstream, сгенерированного инструментальным ПО Gowin Yunyuan, непосредственно в ПЛИС или в микросхему внешней памяти конфигурации ПЛИС. Особенности: • поддержка операционных систем Windows и Linux; • поддержка всех серий ПЛИС Gowin; • поддержка загрузки файла bitstream во внутреннюю память SRAM ПЛИС, внутреннюю Flash-память ПЛИС и во внешнюю Flash-память через интерфейс JTAG; • интерфейс USB с поддержкой USB1.0, USB2.0; • интерфейс USB поддерживает возможность выдавать питание +5 В; • интерфейс JTAG поддерживает загрузку в целевое устройство с напряжением питания от 1,2 В до 3,3 В; • максимальная скорость интерфейса JTAG до 30 Мбит/с; • соответствует стандарту RoHS
B-OP901-16	Шестнадцатиканальный промышленный offline-программатор ПЛИС GOWIN. Представляет собой автономное устройство, которое программирует ПЛИС семейства GW1N(R). Обладает такими функциями, как конфиденциальность данных, переносимость, многопутевое программирование. Предназначен для крупносерийного производства. Может одновременно автономно программировать шестнадцать ПЛИС, что значительно увеличивает производительность массового производства. Устройство шифрует и сохраняет данные, используя усовершенствованный алгоритм шифрования AES-128

и программаторы для ПЛИС собственного производства, перечень и краткие характеристики которых приведены в табл. 2. Внутрисхемный загрузочный кабель PL_USB_CABLE_V5.0, внешний вид которого показан на рис. 2, является функциональным подобием широко распространённого загрузочного кабеля USB Blaster от Intel (Altera) и предназначен для загрузки конфигурации в ПЛИС GOWIN, установленную в целевой системе, то есть является online-программатором. Прочие аппаратные средства загрузки от GOWIN, перечисленные в табл. 2, позиционируются производителем как offline-программаторы, то есть устройства, производящие загрузку конфигурации в ПЛИС, находящейся вне целевой системы. На рис. 3 показан внешний вид четырёхканального промышленного программатора OL-Programmer-A_V3.0 (B-OP710-4) с подключёнными к нему четырьмя платами с сокетными разъёмами для программируемых ПЛИС. На рис. 4 показан внешний вид шестнадцатиканального автономного промышленного программатора B-OP901-16.

2. Средства аппаратной поддержки ПЛИС GOWIN от сторонних производителей

Поддержку разработки приложений на базе ПЛИС от GOWIN, помимо самой фирмы GOWIN Semiconductor Corp, оказывают также сторонние производители, например, фирма SIPEED в своей линейке отладочных плат TANG [2]. Указанные платы имеют на рынке весьма демократичную цену и идеально подходят для первоначального освоения ПЛИС GOWIN.

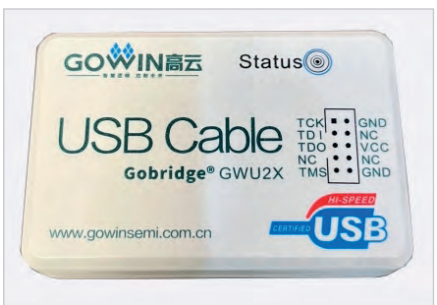


Рис. 2. Внутрисхемный загрузочный кабель PL_USB_CABLE_V5.0

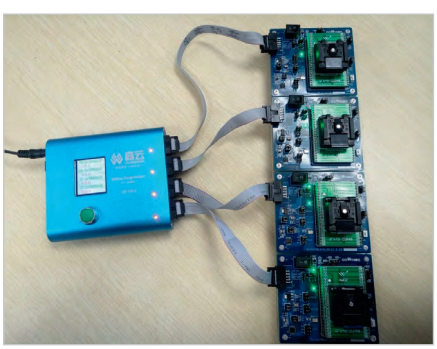


Рис. 3. Четырёхканальный промышленный программатор OL-Programmer-A_V3.0 (B-OP710-4) с подключёнными ПЛИС

Рис. 4. Шестнадцатиканальный промышленный программатор B-OP901-16

Перечень и краткие характеристики отладочных плат с ПЛИС GOWIN от SIPEED приведены в табл. 3.

Таблица 3. Отладочные платы с ПЛИС GOWIN от SIPEED

Название платы (набора)	Семейство ПЛИС, установленной на плате	Наименование ПЛИС, установленной на плате	Краткое описание платы: ресурсы и поддерживаемые интерфейсы
Tang Nano	GW1N	GW1N-1-LV	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС: • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 1,2 В; • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • загрузка конфигурации ПЛИС через JTAG, контакты которого выведены на отдельный разъём; • кварцевый генератор 24 МГц; • микросхема PSRAM IPS6404 объёмом 64 Мбит; • разъём FPC40 для подключения LCD; • пользовательские GPIO (около 30 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
Tang Nano 1K	GW1NZ	GW1NZ-LV1	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС: • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 1,2 В; • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • кварцевый генератор 27 МГц; • разъём FPC40 для подключения LCD; • пользовательские GPIO (около 30 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
Tang Nano 4K	GW1NSR	GW1NSR-LV4C	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС SoC: • установленная на плате ПЛИС является системой на кристалле (SoC), имеющей помимо программируемой логики встроенное аппаратное процессорное ядро Cortex-M3, а также встроенную память PSRAM; • загрузка конфигурации ПЛИС и встроенного ПО процессорного ядра через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; •отладка встроенного ПО процессорного ядра с помощью внешнего отладчика J-Link через JTAG, контакты которого выведены на разъём GPIO; • микросхема SPI Flash-памяти объёмом 32 Мбит; • интерфейс HDMI TX; • интерфейс видеокамеры (24-контактный разъём DVP); • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 2,5 В, 1,8 В; • пользовательские GPIO (около 30 GPIO выведено на разъёмы), пользовательские светодиоды, кнопки
Tang Nano 9K	GW1NR	GW1NR-9	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС: • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • микросхема SPI Flash-памяти объёмом 32 Мбит; • интерфейс HDMI TX; • интерфейс RGB, разъём RGB LCD; • интерфейс SPI; • слот TF-карты; •интерфейс UART, реализованный в виде преобразователя USB-UART, совмещённого с преобразователем USB-JTAG в одной микросхеме BL702; • стабилизатор напряжения 3,3 В; • пользовательские GPIO (около 30 GPIO выведено на разъёмы), пользовательские светодиоды, кнопки
Tang Primer 20K	GW2A	GW2A-LV18PG256C8/I7	Плата продвинутого уровня для разработки сетевых и аудиоприложений: • загрузка конфигурации ПЛИС через JTAG, контакты которого выведены на отдельный разъём; • микросхема SPI Flash-памяти объёмом 32 Мбит; • кварцевый генератор 27 МГц; • модуль памяти DDR3 SDRAM 128 Мбит; • слот TF-карты; •интерфейс UART, реализованный в виде преобразователя USB-UART, совмещённого с преобразователем USB-JTAG в одной микросхеме BL702; • разъём для подключения LCD (8-контактный). Плата Tang Primer 20K представляет собой мезонин с большим торцевым разъёмом, предназначенный для установки в слот на базовой плате. Базовая плата для установки мезонина Tang Primer 20K предлагается в двух вариантах: полный (Dock ext-board) и облегченный (Lite ext-board). Базовая плата Dock ext-board: • интерфейс RGB (40-контактный разъём FPC); • интерфейс DVP (24-контактный разъём FPC); • интерфейс подключения цифровых микрофонов (10-контактный разъём FPC); • интерфейс подключения Touch (4-контактный разъём FPC); • микросхема аудиоусилителя LPA4809MSF с выходным аудиоразъёмом 3,5 мм; • 4 интерфейса PMOD; • интерфейс USB OTG пользовательский с переключателем DEVICE-HOST; • интерфейс USB, представляющий собой преобразователь USB-JTAG для загрузки конфигурации ПЛИС; • интерфейс HDMI; • интерфейс Ethernet 10/100M на базе микросхемы TL8201F; • антенна Wireless для реализации функции Wireless микросхемы BL702; • пользовательские GPIO, пользовательские светодиоды (в том числе RGB), переключатели, кнопки. Облегчённая плата Lite ext-board: • 4 интерфейса PMOD; • пользовательские GPIO, переключатели, кнопки

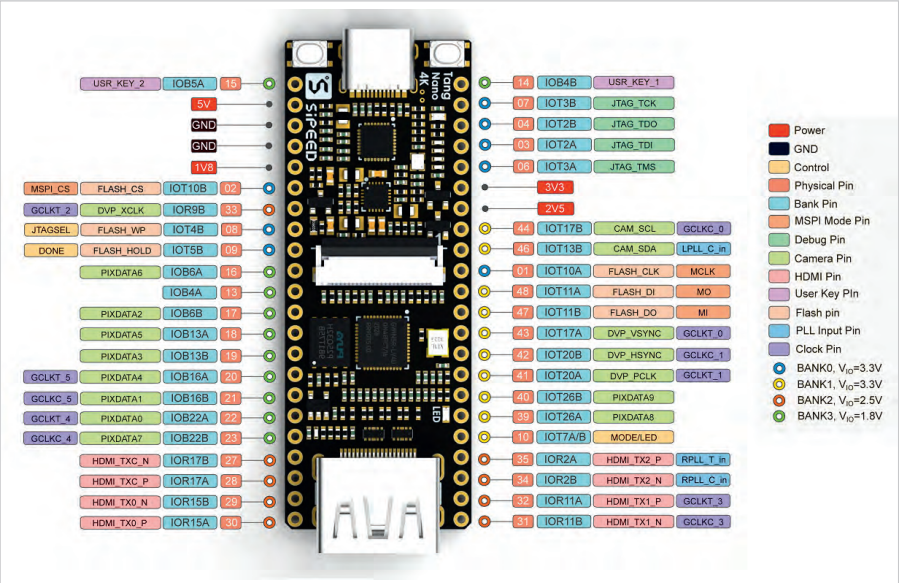


Рис. 5. Отладочная плата TangNano 4K

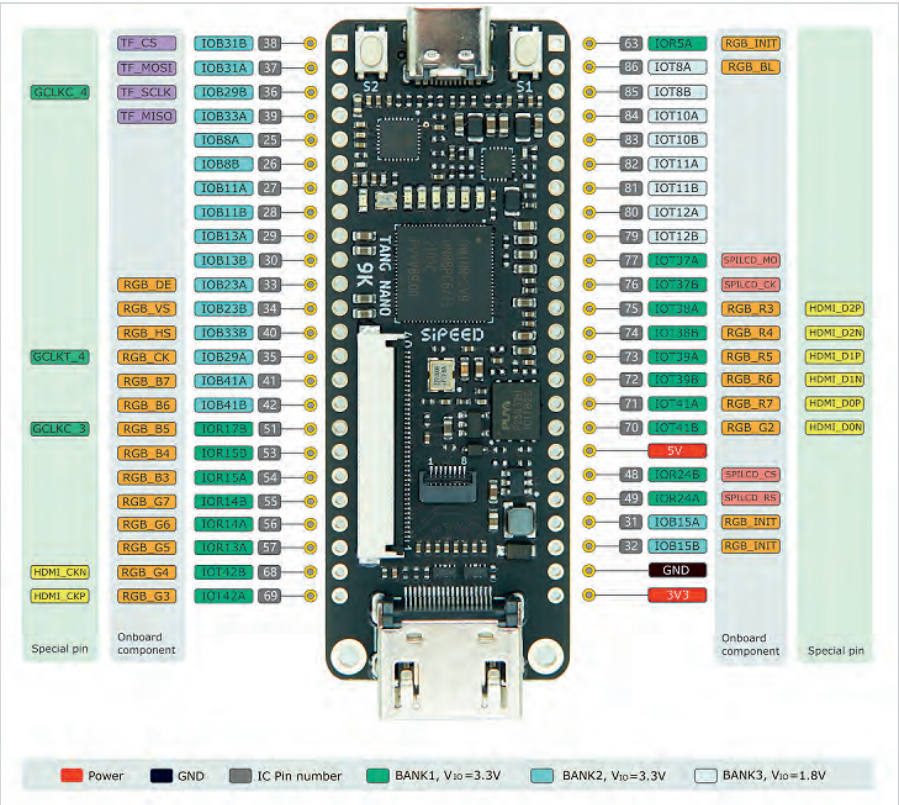


Рис. 6. Отладочная плата TangNano 9K

Схемы, описания, ПО поддержки, драйверы, примеры проектов и прочую документацию для перечисленных в таблице отладочных плат можно загрузить с репозитория SIPEED по ссылкам на странице [3].

На рис. 5 показан внешний вид отладочной платы TangNano 4K от SIPEED с указанием номеров и функций выводов ПЛИС, выведенных на пользовательские разъёмы платы.

На рис. 6 показан внешний вид отладочной платы TangNano 9K от SIPEED с указанием номеров и функций выводов ПЛИС, выведенных на пользовательские разъёмы платы.

В последующих частях настоящей статьи будут рассматриваться учебные проекты ПЛИС, использующие в качестве аппаратных платформ платы TangNano 4K и TangNano 9K.

Плата Tang Primer 20K представляет собой мезонин с большим торцевым разъёмом, предназначенный для установки в слот на базовой плате. Базовая плата для установки мезонина Tang

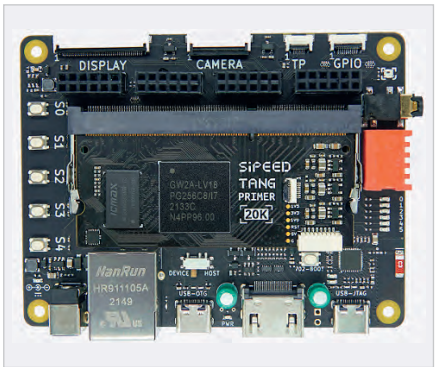


Рис. 7. Отладочная мезонинная плата Tang Primer 20K на базовой плате Dockext-board

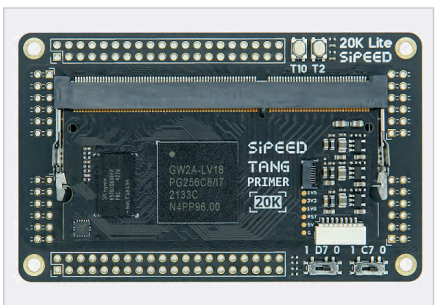


Рис. 8. Отладочная мезонинная плата Tang Primer 20K на базовой плате Liteext-board

Рис. 9. Отладочная плата TEC0117

Primer 20K предлагается в двух вариантах: полный – Dockext-board (рис. 7) и облегчённый – Liteext-board (рис. 8).

Также на рынке предлагается отладочная плата с ПЛИС GOWIN TEC0117 от фирмы Trenz Electronic [4]. Краткая характеристика платы TEC0117 приведена в табл. 4, а её внешний вид показан на рис. 9.

Описания, ПО поддержки, драйверы, примеры проектов и прочую документацию для отладочной платы TEC0117 можно загрузить с репозитория по ссылкам на странице [5].

Заметим, что по стоимости плата TEC0117 от Trenz Electronic не может конкурировать с платами из линейки TANG от SIPEED при примерно равных функциональных возможностях.

Таблица 4. Отладочная плата с ПЛИС GOWIN от Trenz Electronic

Название платы (набора)	Семейство ПЛИС, установленной на плате	Наименование ПЛИС, установленной на плате	Краткое описание платы: ресурсы и поддерживаемые интерфейсы
TEC0117-01-A	GW1NR	GW1NR-LV9	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС: • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 1,2 В; • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • загрузка конфигурации ПЛИС через JTAG, контакты которого выведены на отдельный разъём; • микросхема SPI Flash-памяти объёмом 8 Мбит; • интерфейс UART, доступный через USB; • кварцевый генератор 100 МГц; • пользовательские GPIO (22 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки

Таблица 5. Отладочные платы с ПЛИС GOWIN от Magic Jelly Bean Organization

Название платы (набора)	Семейство ПЛИС, установленной на плате	Наименование ПЛИС, установленной на плате	Краткое описание платы: ресурсы и поддерживаемые интерфейсы
MJB_V1.2	GW2AR	GW2AR-LV18QN88P	Плата начального уровня, ориентированная на разработку приложений, связанных с обработкой видео и графики: • микросхема SPI Flash-памяти ёмкостью 64 Мбит, с возможностью загрузки из неё конфигурации ПЛИС; • загрузка конфигурации ПЛИС через USB с помощью преобразователя USB-JTAG; • стабилизаторы напряжений 3,3 В, 2,8 В, 2,5 В, 1,8 В, 1,2 В, 1,0 В; • кварцевый генератор 12 МГц; • интерфейс MIPI (1 линия синхросигнала + 2 линии данных); • интерфейс HDMI TX; • интерфейс HDMI RX; • пользовательские GPIO (16 GPIO выведено на разъёмы), светодиоды и пользовательские кнопки
MJB MiniStar Nano	GW1NS	GW1NS-4C	Плата начального уровня для первоначального освоения работы с ПЛИС SoC: • очень малые размеры: 26×17,9 мм; • установленная на плате ПЛИС является системой на кристалле (SoC), имеющей, помимо программируемой логики, встроенное аппаратное процессорное ядро Cortex-M3; • загрузка/отладка встроенного ПО процессорного ядра через JTAG с помощью внешнего отладчика J-Link через выделенные контакты на разъёме; • микросхема SPI Flash-памяти объёмом 64 Мбит; • кварцевый генератор 27 МГц

Также на рынке предлагается отладочная плата с ПЛИС GOWIN MJB_V1.2 от фирмы Magic Jelly Bean Organization [6]. Краткая характеристика платы MJB_V1.2 приведена в табл. 5, а её внешний вид показан на рис. 10.

Описания, ПО поддержки и прочую документацию для отладочной платы MJB_V1.2 можно загрузить с репозитория по ссылкам на странице [7].

Помимо платы MJB_V1.2, фирма Magic Jelly Bean Organization предлагает на рынке самую миниатюрную (размеры 26×17,9 мм) отладочную плату с ПЛИС GOWIN – MiniStar Nano [6]. Краткая характеристика платы MiniStar Nano приведена в табл. 5, а её внешний вид показан на рис. 11.

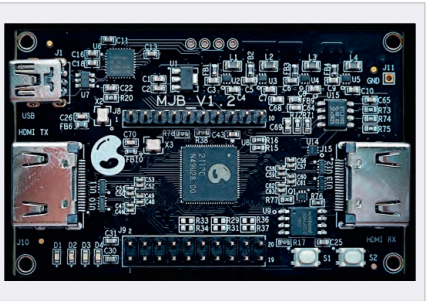


Рис. 10. Отладочная плата MJB_V1.2

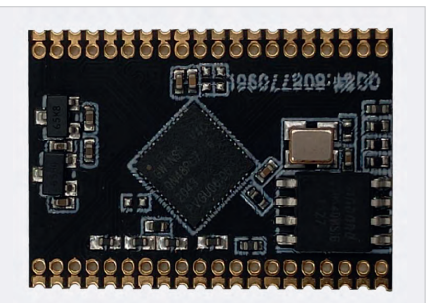


Рис. 11. Отладочная плата MiniStar Nano

Описания, ПО поддержки и прочую документацию для отладочной платы MiniStar Nano можно загрузить с репозитория по ссылкам на странице [8].

Литература

1. URL: https://www.gowinsemi.com/en/support/devkits/37.
2. URL: https://en.wiki.sipeed.com/hardware/en/tang/index.html.
3. URL: https://dl.sipeed.com/shareURL/TANG.
4. URL: https://shop.trenz-electronic.de/en/TEC0117-01-A-FPGA-Module-with-GOWIN-LittleBee-and-8-MByte-internal-SDRAM.
5. URL: https://wiki.trenz-electronic.de/display/PD/TEC0117+Resources.
6. URL: https://magicjellybeanfpga.github.io/mjb/.
7. URL: https://github.com/magicjellybeanfpga/MJB-V1.2-Board.
8. URL: https://github.com/magicjellybeanfpga/MiniStar-Nano#readme.

НОВОСТИ МИРА

Автомобили Mercedes в России отключили от онлайн-сервисов

Сервис Mercedes me ID, позволяющий контролировать автомобиль удалённо, прекращает работу на российском рынке сообщает drive2.ru.

Как следует из сообщений пользователей, замена сервиса не предусматривается.

При определённых обстоятельствах деактивация сервиса может повлиять на другие существующие договоры, такие как Mercedes me connect (сервис удалённого просмотра состояния автомобиля через мобильное приложение. – Ред.), – предупредила компания.

На сайте Mercedes-Benz Group указывается, что с понедельника Mercedes-Benz AG прекратила свою деятельность на российском рынке.

Напомним, в 2021 году правительство Китая запретило экспорт данных, собираемых «подключёнными» автомобилями, а через месяц предписало создать для таких данных систему безопасности.

Серверы Mercedes, к которым подключены автомобили, находятся за пределами РФ.

Отключение автомобилей от онлайн-сервисов означает отказ компании исполнять оплаченные обязательства. Напомним по случаю об аналогичной истории с HP Inc., которой суд предписал вернуть российским контрагентам деньги за неисполненные контракты.

industry-hunter.com

Замещение человеческого участия и тенденции искусственного интеллекта. Прогноз на 2023-й и последующие годы

Антти Суомалайнен

Наступает 23-й год XXI века, и в заметке, посвящённой этому событию, мы решили рассмотреть некоторые перспективы развития современной электроники и сетей, созданных на её основе.

Если квантовые вычисления считают главным трендом развития отрасли, связанной с высокими технологиями и компьютерами, то квантовая телепортация и высочайшая скорость обмена информацией не кажутся фантастикой. Благодаря подключению своих мобильных девайсов к квантовым компьютерам мы получим мгновенный доступ к большим массивам данных, накопленных человечеством. В отличие от обычного компьютера, квантовый обрабатывает информацию не по частям, а целиком – с возможностью мгновенно анализировать огромные объёмы информации. Последствия квантовой технической революции, разумеется, ожидаются в нескольких сферах.

В бытовой сфере разовьётся Интернет вещей, последует объединение его элементов в большие сети с разным уровнем безопасности и искусственным интеллектом; обмен информацией расширится без участия человека-оператора, таким образом устройства на основе новых технологий выполнят за человека множество рутинных действий, не требуя его вмешательства и настройки. В прошедшем 2022 году элементы системы уже были освоены и работают, однако инновации приведут к ещё большему замещению человека условным электронным роботом, называемым сегодня «искусственный интеллект» (ИИ). В сфере ИИ определяются не менее трёх интересных тенденций.

Технологии искусственного интеллекта в сфере создания контента. Технологии – это инструмент, следовательно, пользоваться им можно по-разному. Стоит также принять во внимание третий закон Ньютона с условной трактовкой «всякое действие рождает противодействие». Если технологии ИИ уже используются для создания недостоверного контента (deepfake), то их использование для распознавания фейкового контента станет повсеместным, тем самым нивелируя производителей фейков на манер антивирусных приложений для ПК. В стране огромное количество видеокамер в общественных местах. Тенденция продолжится с расцветом **технологии слежения и контроля, обнаружения и предотвращения преступлений или катастроф**. Но в этих примерах есть две условные проблемы, а именно: тот, кто будет управлять фейками, будет влиять и на их содержание. То есть актуализируется вопрос – что именно считать фейковой информацией. Если любая информация будет приобретать легитимность только в случае подтверждения с официальной версией, скажем, на правительственном портале или в СМИ, подконтрольных администрациям (как теперь), то количество «фейков» будет большим, а работа антифейковых фильтров приведёт к ещё большему закрытию, обособленности, ограниченности и, не побоюсь этого слова, кастрации информационного поля.

И второе: видеоконтроль тоже только инструмент, и важно, насколько он будет открыт «для общего пользования». Сегодня не всегда можно быстро и просто, а иногда и невозможно получить видеозапись, скажем, с камер наблюдения за подъездом многоквартирного дома – чтобы определить злоумышленника, ночью совершившего акт хулиганства. Инструменты имеют большую перспективу, но для граждан они условно закрыты. Понятно, что есть исключения – там, где ТСЖ и коммунальные службы не номинально работают с учётом мнения жильцов. Но в общем смысле новации в сфере современной электроники позиционируются пока как повышение уровня контроля государственных структур в связи с их уставными задачами. Какую пользу сие принесёт обычному законопослушному гражданину – вопрос дискуссионный. Поэтому уместно так ставить вопрос – нас ожидает **противостояние «ИИ против ИИ»**.

Развитие нейросетей как элементов искусственного разума перспективно. К примеру, нейросети GPT3 уже способны на конструктивный диалог без участия оператора, однако для их обучения применяли текстовую информацию. Теперь ИИ обучают на мультимодальных данных (текст, аудио, видео) с более глубоким «пониманием» окружающего мира. **Ожидается появление, причём массовое, нейросетей с ИИ, сочиняющих музыку и саундтреки, видео, сценарии и – о ужас! – появление автоматического робота-писателя!** Он никогда не допустит ошибок, автоматически проконтролирует плагиат и скорректирует стилистические неточности. Разумеется, его интеллектуальный багаж – словарный запас. Это то, чем отличается сегодня, помимо стиля, любой хороший автор-человек. И словарный запас робота будет не такой, как 30 слов у Эллочки-людоедки или индейца племени мумбо-юмбо. Причём писательский ИИ даст возможность моментально получать ссылки или «сноски» на примеры, указанные в тексте; иногда этим удобно пользоваться, как неким аналогом информационного словаря, обычно размещаемого в конце технической книги. Искусственный интеллект будет структурированным и разноплановым, как мы имеем автомобильные навигаторы разного качества или машины с разными опциями. Качество подобных роботов-автоматов во многом будет зависеть от баз данных, облачных хранилищ «запаса слов». В упрощённом виде, разумеется, это уже есть. Но искусственный интеллект с высокохудожественными возможностями построения сценариев или хотя бы фигур речи пока не может создавать красоты живого русского языка

Рис. 1. Внешний вид устройства Kissenger

Рис. 2. Приставка к смартфону для распространения запахов в нужное время

на манер приветствия «восторг души, прелестная Диана», «и что за странные задержки даёт её любовный пульс», «как он, такого тунеядца второго нет, хоть и ищу напрасно» (Лопе де Вега «Собака на сене», пер. М. Лозовского), или «майский день, именины сердца», «вы отдохните, подождите, сейчас я скажу приятное для вас слово» (Н.В. Гоголь «Мёртвые души»).

Прогресс в нейросетях затронет экономику, медицину, энергетику, образование и многие другие области нашей жизни. Но в сфере отношений «человек-человек», сиречь сфере психологической, этот важнейший тренд в связи с развитием технической сферы приведёт к ещё более обособленному в социуме состоянию человека разумного, а причинно-следственная связь – к большему развитию социопатии. Поэтому нейросети успешно развиваются в медицинской сфере, в кардиологии, НЛП, в сфере электронных контроллеров различных состояний живого организма, но что касается психических реакций человека разумного на вызовы времени, и их предотвращения, такие, к примеру, методики, как борьба со страхами (страх – самая сильная человеческая эмоция, гораздо сильнее любви) завтрашнего дня в условиях неопределённости, эта сфера пока ещё только открывается искусственному интеллекту.

Новинки прикладного свойства могут поразить даже самые смелые ожидания. Интересны разработки в области вибротактильной стимуляции, устройства, разрабатываемые в этом направлении, имеют относительно небольшую себестоимость, так как используют вибрационные лёгкие и простые в управлении миниатюрные электродвигатели, в том числе в пневматических системах. Пока ещё речь не идёт о широком распространении систем, интенсивно имитирующих человеческие прикосновения, вызывающих богатые интимные эффекты на основе вибрационных паттернов. Но… несомненно, это дело будущего.

Несколько лет назад была презентована пижама Huggy, пользователь которой получает приближенное к реальному ощущение объятий; в устройстве пижамы используются пневматические приводы для создания давления вместо вибраций – примерно, как в массажном кресле. В подобных устройствах передача эмоций по сенсорному каналу происходит мгновенно без всякого кодирования. Также в прошлом разработка мультимодального тактильного устройства для виртуального поцелуя Kissenger, имитирующего реалистичные ощущения поцелуя с помощью тактильного и сенсорных стимулов обоняния. Это уже вчерашний день. Но на данном примере мы можем посмотреть, в каком направлении ожидать развития новых технологий. Авторы идеи малазийцы Эмма Янн Чжани и Адриан Дэвид Чок; я только информирую читателей о том, что происходило в мире в прошлые годы и что нас ждёт завтра.

На рис. 1 представлено устройство с интерфейсом, имитирующим губы.

Применяя это устройство, подключённое к смартфону, пользователь-человек в дистанционном формате ощущает давление губ другого пользователя во время «поцелуя». Как сообщают разработчики, микролинейный приводной массив под поверхностью губ создаёт динамическую обратную связь в реальном времени в различных точках губ пользователя, чтобы воспроизвести тактильные ощущения поцелуя [1]. Устройство позволяет людям выражать близость и передавать эмоции дистанционно посредством опосредованного поцелуя. Что, по мнению разработчиков, устраняет разрыв между традиционной моделью цифровой коммуникации, ранее сосредоточенной на языковой и устной информации, и естественным человеческим общением, в значительной степени зависимой от инстинктивных движений человеческого тела и чувств для передачи значимых невербальных сигналов. В частности, физическое прикосновение и обоняние являются наиболее эффективными каналами для выявления и передачи своих эмоциональных состояний. Таким образом, сделан конкретный шаг вперёд, технически облег-

чающий «эмоциональную близость» между человеком и «машиной» и взаимосвязь между роботами. Разумеется, мы говорим пока только о технической стороне дела.

Однако примеры тоже есть, равно как и подобная дистанционная модель, управляемая смартфоном, распространяющим запахи, – см. рис. 2.

Среди запахов допустимы и концентрированные духи-феромоны, привлекающие внимание противоположного пола. Обмен феромонами происходит во время тесного физического контакта, такого как поцелуи. Феромоны позволяют младенцам идентифицировать своих матерей. Представители обоих гендерных полов используют феромональные сигналы для партнёра, обнаруживая класс генов, называемых «MHC» (Major Histocompatibility Complex) и контролирующих синтез антигенов, определяющих гистосовместимость тканей, присутствующих в запахах тела. Причём разработчик устройства утверждает, что «излучение запаха тела или феромонов из устройства для поцелуев не только создаёт сильное ощущение физического присутствия, но также усиливает связь» [1].

Метод дистанционного поцелуя как способ общения с маленькими детьми и людьми с физическими недостатками или расстройствами общения, возможно, удобен, когда личное общение невозможно. Младенцы не имеют языковых способностей для эффективного общения с использованием слов, поэтому родителям или бабушкам и дедушкам трудно общаться со своими детьми или внуками, когда они не находятся рядом.

Приставка к смартфону с функционалом дистанционного поцелуя хороша как способ интимного общения с близкими, детьми, людьми с физическими недостатками или социопатами (с расстройствами общения), когда личное участие в прикосновении к губам невозможно из-за расстояний или отсутствия времени на такую радость. Особое внимание уделено мягкой и гибкой текстуре силиконовой резины для поверхности электронных губ в непосредственном контакте с губами пользователя. В пресс-релизе говорится, что Kissenger – воплощённый агент для интеллектуальных социальных роботов, помогает делиться физической близостью с людьми, давая виртуальный поцелуй. Так искусственный интеллект становится эмоциональным, и homo sapiens, рождённые от себе подобных, и «люди-роботы» смогут выражать любовь и сочувствие другому виду.

Чтобы до такого додуматься, надо понимать проблематику отношений в эпоху постоянного цейтнота и зарабатывания всех денег мира без перерыва на сон и явь. Автор бы только порекомендовал параллельно озаботиться кибербезопасностью, а то и поцелуй могут украсть. А ведь как важна идея!.. Сегодня отправил авторам изобретения телеграмму: «Простите, но я против ваших методов».

Впрочем, и идеи, и мнения могут быть разными, главное, что технический прогресс в области современной электроники идёт вперёд.

Литература

1. Designing a multimodal haptic device for virtual kissing. Лондонский городской университет, Институт воображения, Малайзия. URL: https://investforesight.com/designing-a-multimodal-haptic-device-for-virtual-kissing/.

RAYSTAR
OLED Display Provider

OLED-дисплеи Raystar

Специсполнение по ТЗ заказчика
Прозрачные модели

АВТОМОБИЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА • СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ • ИЗМЕРИТЕЛИ МОЩНОСТИ • БЫТОВАЯ ТЕХНИКА • МЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ

Характеристики

- Яркость экрана до 150 кд/м² обеспечивает считывание изображения при ярком солнечном свете
- Высокая контрастность 10 000:1
- Широкий угол обзора до ±175°
- Цвет свечения: жёлтый, зелёный, красный, белый, синий
- Формат изображения: 122×32, 128×64, 240×64, 256×64 и 96×64 точки
- Низкая потребляемая мощность 10 мА (схемы управления – токовые)
- Светоэмиссионная схема: не требуется система подсветки
- Короткое время отклика: 10 мкс при температуре +25°C
- Широкий диапазон рабочих температур от –40 до +80°C
- Малая толщина модуля дисплея, небольшой вес
- Срок службы: 50 000 ч для белого и синего цвета; 100 000 ч для жёлтого, зелёного, красного цветов

ProChip powered by ProSoft
ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР
АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА
(495) 232-2522 ▪ INFO@PROCHIP.RU ▪ WWW.PROCHIP.RU
Реклама

Современные продукты компании Microchip. Особенности 32-разрядных микроконтроллеров семейства SAM

Юрий Петропавловский

В статье приведены номенклатура и области применения 32-разрядных микроконтроллеров компании Microchip Technology семейств PIC, SAM, CEC. Рассмотрены особенности и приведены характеристики современных 32-разрядных микроконтроллеров Microchip семейства SAM.

32-разрядные микроконтроллеры находят применение в оборудовании и изделиях самого различного назначения. Компания Microchip выделяет ряд целевых областей применения своих продуктов данной категории.

- Промышленное оборудование – передача файлов через интерфейс EtherCAT (рис. 1), системы управления промышленными двигателями, бюджетные решения для сенсорных экранов и графики, решения для организации наблюдения за движением (перемещением), сети TCP/IP, решения для термокамер, преобразователи USB в Dual-UART, торговые автоматы.
- Интернет вещей (IoT) – решения для голосовых сервисов Amazon Alexa Connect Kit (ACK), Bluetooth для метеостанции, фитнес-трекеры (браслеты), интеллектуальные сенсорные узлы реального времени FreeRTOS, IoT для терминалов и точек доступа, IoT-платформы для датчиков движения, IoT для интеллектуальных систем управления, IoT для интеллектуального мониторинга объектов и ряд других приложений.
- Медицинские приборы и оборудование – глюкометры, измерители артериального давления, приборы для искусственной вентиляции лёгких, ЭКГ и ионофореза, кислородные концентраторы, системы мониторинга пациентов и другие приборы.
- Человеко-машинные интерфейсы – голосовой сервис AWS Alexa Connect, графические и пользовательские интерфейсы (GUI), устройства для обнаружения жестов, обнаружители ключевых слов и звуков (приложение Edge Impulse), сенсорные панели управления и другие приложения.
- Связь, машинное обучение, автомобильные и потребительские приложения.

По мнению компании, к причинам перехода от 8/16-разрядных микроконтроллеров (МК) к 32-разрядным относится необходимость увеличения объёма памяти и производительности текущих проектов. Осуществить такой переход при использовании МК Microchip осуществляется достаточно легко при использовании экосистемы MPLAB. Для облегчения процесса перехода компания предлагает ряд ресурсов (руководств) для конкретных семейств МК.

В категории 32-разрядных микроконтроллеров каталога Microchip 2023 года представлена широкая номенклатура продуктов, разделённых на группы, семейства, подсемейства и серии, при этом в документации многие из этих градаций фигурируют под общим наименованием Family. Группа SAM (SAM Family of 32-bit Microcontrollers) включает следящие семейства МК: SAM V7xx, SAM E7xx, SAM S7xx, SAM Exx, SAM D5xx, SAM G, SAM 4, SAM D, SAM C, SAM L21/L22, SAM L10/L11. В группу PIC32 (PIC32 Family of 32-bit PIC® Microcontrollers) входят следующие семейства продуктов: PIC32MZ EF/DA, PIC32MK/MX, PIC32CM JH, PIC32CM LX, PIC32CM MC, PIC32MM. Группа CEC (32-bit Microcontrollers) включает семейства CEC173x, CEC1712, CEC1702.

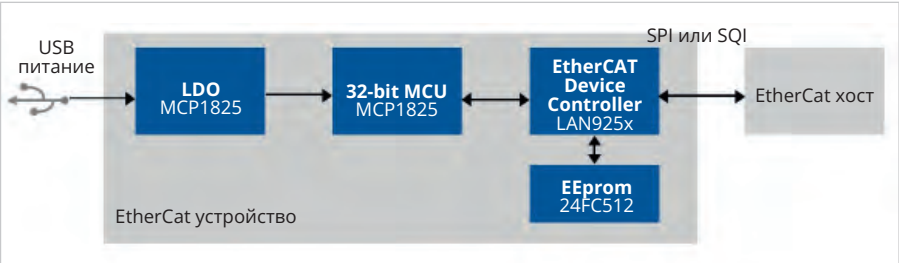


Рис. 1. Интерфейс EtherCAT

Микроконтроллеры группы SAM отличаются хорошим балансом между производительностью и энергопотреблением. МК группы могут быть использованы как в промышленных приложениях, так и в бытовых приборах, состав и рекомендуемые компанией области применения МК группы приведены на рис. 2.

Микроконтроллеры семейства SAM C базируются на процессорном ядре Arm Cortex-M0+, содержат узлы защиты памяти (Memory Protection Unit – MPU) и буферы микротрассировки (Micro Tracer Buffer – MTB), основные особенности МК семейства:

- относительно большое напряжение питания 2,7...5,5 В обеспечивает хорошее соотношение сигнал/шум и надёжности с точки зрения помехозащищённости, электромагнитной совместимости и защиты от электростатических разрядов;
- диапазон рабочих температур от –40 до +125/85°C при рабочей частоте 48/64 МГц;
- периферийный сенсорный котроллер с помощью технологии QTouch обеспечивает аппаратную поддержку кнопок, ползунков, колёсиков, а также ёмкостных датчиков прикосновения без использования внешних компонентов и без необходимости каких-либо настроек пользователями;
- периферийная гибкость обеспечивает поддержку интерфейсов I^2C, USART/UART, SPI, LIN, Host/client, RS-485, PMBus;

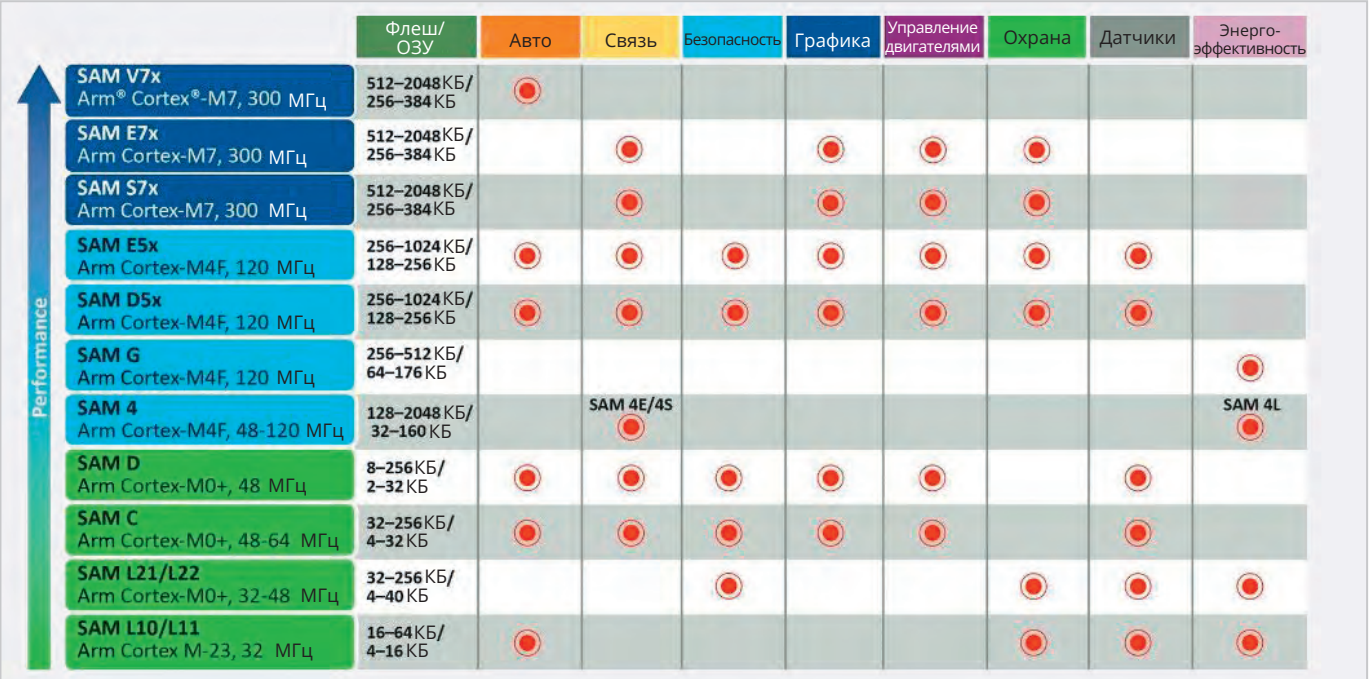


Рис. 2. Рекомендованные сферы применения МК группы SAM

- поддержка локальных промышленных сетей CAN 2.0A/B, CAN FD 1.0;
- 12-канальный контроллер прямого доступа к памяти (Direct Memory Access – DMA);
- объём флеш ЗУ от 32 КБ до 256 КБ, число выводов от 32 до 100;
- конфигурируемая пользователем логика (Configurable Custom Logic – CCL).

МК SAM C подразделяются на две серии SAM C20 и SAM C21, отличающиеся составом и характеристиками внутренних устройств (памяти, АЦП, модули периферии и другие). Целевые приложения МК: управление двигателями промышленных приводов, автомобильное оборудование, сенсорные и жестовые технологии, беспроводные зарядные устройства. В состав семейства МК SAM C входит более двух десятков микросхем с различными характеристиками, определить некоторые из них можно по их наименованиям. Рассмотрим это на примере МК ATSAMC21N18A-MUTS.

N – число контактов (E – 32, G – 48, J – 64, N – 100)

18 – объём флеш-памяти (18–256 Кбайт, 17–128 Кбайт, 16–64 Кбайт, 15–32 Кбайт)

A – вариант прибора (A – исходный)

M – тип корпуса (A – TQFP, M – VQFN (TMB), MN – VQFN (5LX), U – WLCSP)

U – диапазон рабочих температур (U (–40…+85°C), N (–40…+105°C), Z (–40…+125°C))

T – тип упаковки (T – лента на катушке, без буквы – на лотках)

S – рабочая частота процессора и точность заводской установки (без буквы – 48 МГц стандартная точность, S1 – 64 МГц и стандартная точность, S2 – 48 МГц и улучшенная точность)

Следует отметить, что приведённые буквенно-числовые обозначения могут относиться и к МК других семейств SAM. Базовый перечень МК SAMC20/C21 и характеристики их памяти приведены на рис. 3, структура МК – на рис. 4, виды используемых корпусов – на рис. 5, основные особенности МК SAMC20 (в скобках – отличающиеся характеристики SAMC21):

- процессорное ядро Arm Cortex-M0+ с рабочей частотой до 48 МГц;
- объём встроенной флеш-памяти до 256 Кбайт ОЗУ SRAM до 32 Кбайт;
- рабочее напряжение 2,7...5,5 В;
- до восьми модулей последовательной памяти SERCOM;
- 12 каналов АЦП, 4 или 2 аналоговых компаратора;
- аппаратная поддержка датчиков периферийными контроллерами;
- корпуса QFP, QFN, WLCSP, число выводов 100, 64, 56, 48, 32, число портов ввода/вывода GPIO – 84, 52, 38, 26;
- 5 или 8 таймеров счётчиков, два ШИМ-формирователя, таймер реального времени, 16 линий внешних прерываний;
- 6 или 12 каналов DMA (12);
- периферийные сенсорные контроллеры в конфигурации 16×16, 11×11, 8×8;

Прибор	Флеш ЗУ (КБ)	ОЗУ SRAM (КБ)
ATSAMC20E15	32	4
ATSAMC20E16	64	8
ATSAMC20E17	128	16
ATSAMC20E18	256	32
ATSAMC20G15	32	4
ATSAMC20G16	64	8
ATSAMC20G17	128	16
ATSAMC20G18	256	32
ATSAMC20J15	32	4
ATSAMC20J16	64	8
ATSAMC20J17	128	16
ATSAMC20J18	256	32
ATSAMC20N17	128	16
ATSAMC20N18	256	32

Рис. 3. Характеристики МК SAMC20/C21

- интерфейс CAN с поддержкой стандартов ISO CAN FD, ISO 11898-2:2015;
- система событий DMA;
- 16-разрядный ЦАП;
- датчик температуры;
- ускоритель деления и квадратного корня DIVAS.

Более подробно характеристики МК SAM C20 приведены в табл. 1, SAM C21 – в табл. 2.

Большинство выводов МК, обозначенных как PAxx, PBxx, PCxx, (см. рис. 5), являются многофункциональными, их назначение устанавливается при отладке (программировании) МК. Однако конкретные выводы не являются полностью универсальными, их назначение ограничивается только определёнными функциями,

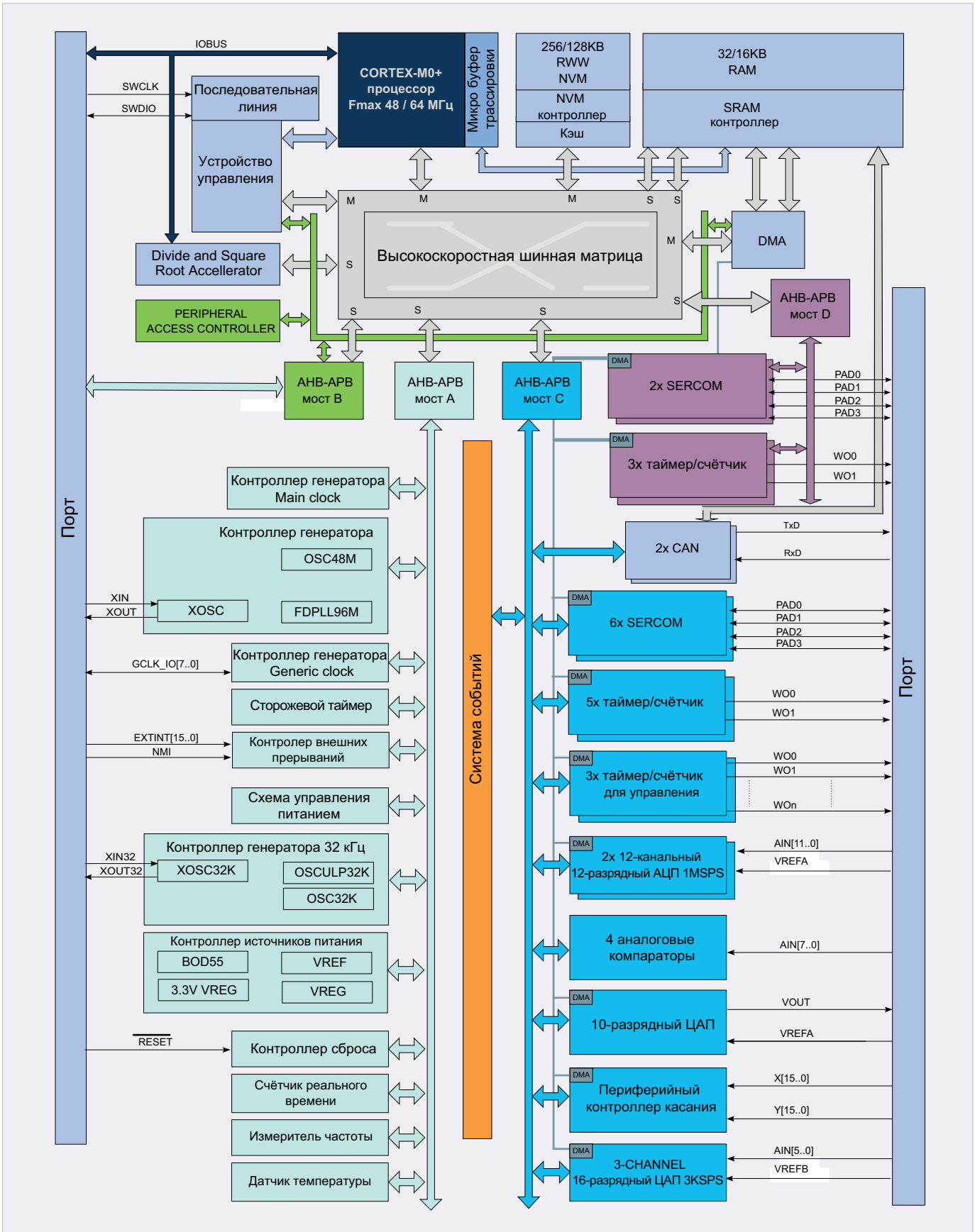


Рис. 4. Структура МК SAMC20/C21

описанными в спецификациях и руководствах по применению конкретных типов микросхем. Для отладки МК компания Microchip предоставляет программное обеспечение MPLAB – экосистема разработки и программные инструменты, MPLAB X – интегрированная среда разработки и другие программные и аппаратные продукты.

Микроконтроллеры SAM D предназначены для широкого спектра промышленных и потребительских приложений с малым энергопотреблением. МК SAM D подразделяются на семей-

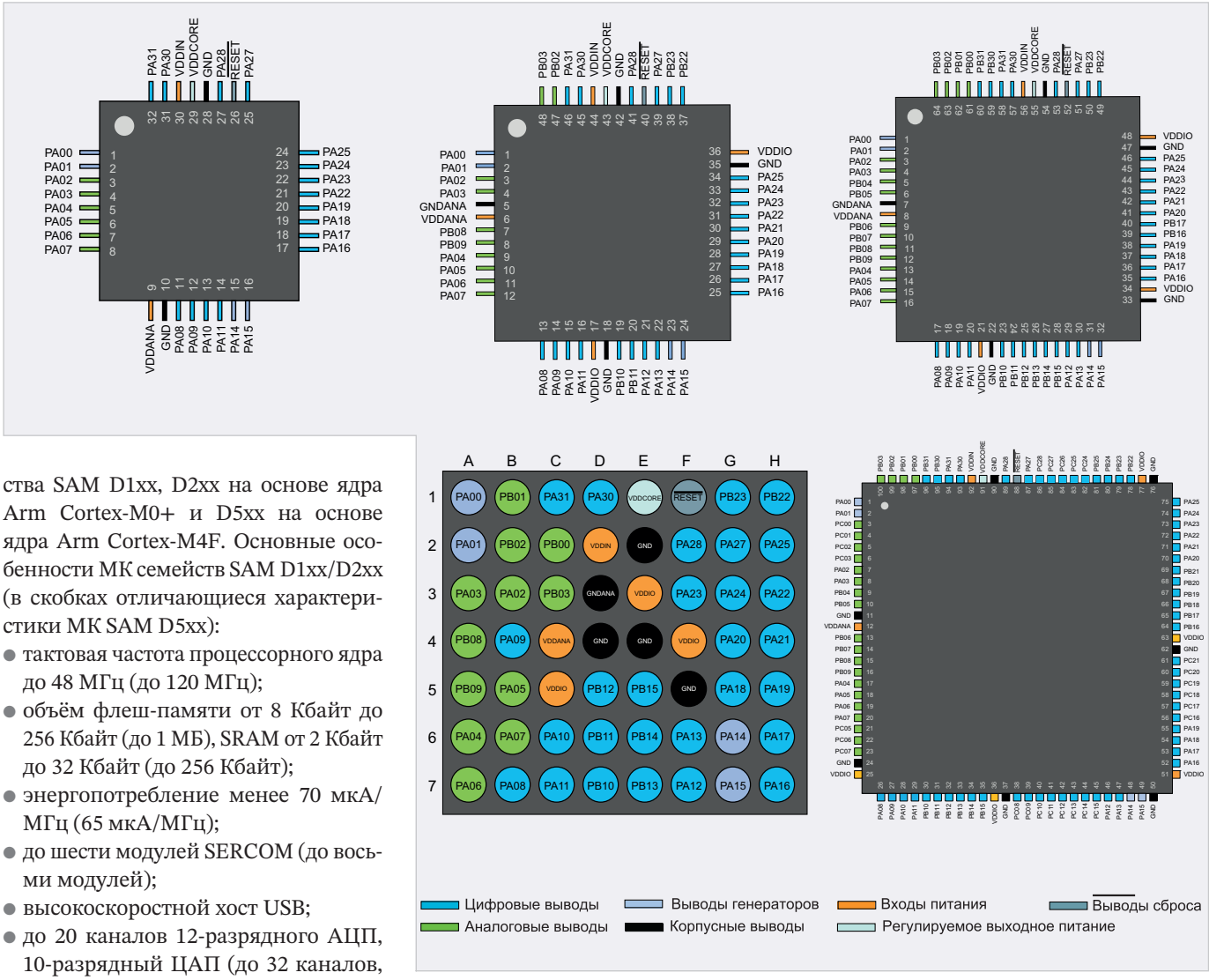


Рис. 5. Виды корпусов МК SAMC20/C21

ства SAM D1xx, D2xx на основе ядра Arm Cortex-M0+ и D5xx на основе ядра Arm Cortex-M4F. Основные особенности МК семейств SAM D1xx/D2xx (в скобках отличающиеся характеристики МК SAM D5xx):

- тактовая частота процессорного ядра до 48 МГц (до 120 МГц);
- объём флеш-памяти от 8 Кбайт до 256 Кбайт (до 1 МБ), SRAM от 2 Кбайт до 32 Кбайт (до 256 Кбайт);
- энергопотребление менее 70 мкА/МГц (65 мкА/МГц);
- до шести модулей SERCOM (до восьми модулей);
- высокоскоростной хост USB;
- до 20 каналов 12-разрядного АЦП, 10-разрядный ЦАП (до 32 каналов, сдвоенный 12-разрядный АЦП, сдвоенный 12-разрядный ЦАП);
- поддержка технологии QTouch, корпуса от 14 до 64 выводов (от 48 до 128 выводов);
- интерфейс QSPI с поддержкой технологии XIP;
- интегрированные функции безопасности и аппаратного шифрования.

Высокопроизводительные микроконтроллеры SAM E подразделяются на семейства SAM E5xxx с ядром Arm Cortex-M4F со средней производительностью и SAM E7xx на основе ядра Arm Cortex-M7 с высокой производительностью. МК SAM E ориентированы на применение в системах промышленной автоматизации и управления зданиями. Приведём некоторые особенности МК семейства SAM E5xx (в скобках отличающиеся характеристики SAM E7xx):

- SAM E51 – два интерфейса CAN FD, SAM E53 – интерфейс Ethernet MAC, SAM E54 – два порта CAN FD и Ethernet MAC (SAM E70, два интерфейса CAN FD 1.0);

Таблица 1. Подробные характеристики SAM C20

	SAM C20N	SAM C20J	SAM C20G	SAM C20E
Число каналов АЦП	12	12	12	10
Количество АЦП	1	1	1	1
Аналоговые компараторы	4	2	2	2
Таймеры реального времени (RTC)	Да	Да	Да	Да
Схемы активации RTC	1	1	1	1
Схемы сравнения значений RTC	1×32 бит или 2×16 бит	1×32 бит или 2×16 бит	1×32 бит или 2×16 бит	1×32 бит или 2×16 бит
Число линий внешних прерываний	16	16	16	16
	32	32	22	16
Периферийный контроллер касаний (PTC), число самостоятельных ёмкостных каналов (Y-линий)	32			
PTC, число зависимых ёмкостных каналов (X-линий)	256 (16×16)	256 (16×16)	121 (11×11)	64 (8×8)
Измеритель тактовой частоты	Да	Да	Да	Да
Максимальная частота процессора	48/64 МГц	48/64 МГц	48/64 МГц	48/64 МГц
Типы корпусов	TQFP	TQFP, VQFN, WLCSP	VQFN, TQFP	VQFN, TQFP
Генераторы	32,768 кГц, 0,4...32 МГц, 48 МГц, 96 МГц	То же	То же	То же
Число каналов системы событий	12	12	12	12
Интерфейс отладки (SWDebug)	Да	Да	Да	Да
Сторожевой таймер (WDT)	Да	Да	Да	Да

Таблица 2. Подробные характеристики SAM C21

	SAM C21N	SAM C21J	SAM C21G	SAM C21E
Число выводов	100	64, 56 для WLCSP	48	32
Число вводов/выводов общего назначения (GPIO)	84	52, 44 для WLCSP	38	26
Флеш ЗУ	256/128 Кбайт	256/128/64/32 Кбайт	256/128/64/32 Кбайт	256/128/64/32 Кбайт
Секции флеш ЗУ типа «чтение во время записи»	8/4 Кбайт	8/4/2/1 Кбайт	8Ъ4/2/1 Кбайт	8/4/2/1 Кбайт
ОЗУ SRAM	32/16 Кбайт	32/16/8/4 Кбайт	32/16/8/4 Кбайт	32/16/8/4 Кбайт
Таймеры-счётчики (TC)	8	5	5	5
Число каналов с выходами волновой формы/ШИМ на каждый TC	2	2	2	2
Максимальный и минимальный захват TC	Да	Нет	Нет	Нет
Таймеры-счётчики для управления TCC	3	3	3	3
Число каналов с выходами волновой формы/ШИМ на каждый TCC	08.04.2002	08.04.2002	08.04.2002	08.04.2002
Число каналов DMA	1 2	1 2	1 2	1 2
Интерфейсы CAN	2	2	2	1
Конфигурируемая пользователем логика (CCL, LUTs)	4	4	4	4
Интерфейсы SERCOM	8	6	6	4
Ускорители деления и извлечения квадратного корня (DIVAS)	да	да	да	да
Число каналов АЦП	22	20	14	10
Число АЦП	2	2	2	2
Число каналов сигма-дельта АЦП (SDADC)	3	3	2	1
Аналоговые компараторы (AC)	4	4	4	4
Число каналов ЦАП	1	1	1	1
Счётчики реального времени (RTC)	Да	Да	Да	Да
Схемы акцивации RTC	1	1	1	1
Схемы сравнения значений RTC	1×32 бит или 2×16 бит	То же	То же	То же
Внешние линии прерываний	16	16	16	16
Периферийные контроллеры касаний (PTC)	32	32	22	16
Число самостоятельных ёмкостных каналов касаний (Y-линий)	32	32	32	16
Число зависимых ёмкостных каналов касаний (X-линий)	256 (16×16)	256 (16×16)	128 (11×11)	64 (8×8)

- рабочая частота до 120 МГц (до 300 МГц), флеш-память до 1 Мбайт (2 Мбайт), SRAM до 256 Кбайт (384 Кбайт);
- до двух безопасных контроллеров хоста SDHC;
- периферийный контроллер датчиков PTC с поддержкой до 256 каналов ёмкостного сенсорного ввода;
- высокоскоростной Full Speed USB с хостом/устройством;
- до 32 каналов сдвоенного АЦП с быстродействием 1 Мбит/с (2 Мбит/с), два 12-разрядных ЦАП;
- порты последовательной связи SERCOM, конфигурируемые пользователями как UART/USART, SPI, ISO/IEC 7816, I^2C;
- диапазон рабочих температур –40… +85°C, корпуса от 48 до 128 выводов (от 64 до 144 выводов);
- интерфейс датчиков изображения КМОП.

Микроконтроллеры семейства SAM G предназначены для приложений со сверхмалым энергопотреблением и высокой производительностью. Семейство МК представлено четырьмя сериями SAM G51/53/54/55, выполненными в корпусах WLCSP-49 или LQFP-100. МК семейства выполнены по энергоэффективной технологии picoPower с потреблением менее 100 мкА/МГц в активном режиме и ниже 7 мкА в спящем режиме. Все МК выполнены на базе 32-разрядного RISC-процессора Arm Cortex-M4F и сопроцессора с плавающей точкой (FPU). Приведём некоторые особенности МК серии SAM G51 (в скобках отличающиеся характеристики других серий):

- рабочая частота процессоров до 48 МГц (96 МГц для G54, до 120 МГц для G55);
- объём флеш-памяти до 256 Кбайт, ОЗУ SRAM до 64 Кбайт (до 512/96 Кбайт для G53/G54, до 512/176 Кбайт для G55);
- ток потребления в активном режиме порядка 103 мкА/МГц, в режиме ожидания 6,8 мкА (8 мкА для G53, G54, G55);
- время перехода в активный режим 3,2 мкс (5 мкс для G53/G54/G55);
- корпуса WLCSP с 49 шариковыми выводами и LQFP со 100 выводами (WLCSP/49, LQFP/64, QFN/64 для G55).

Следует отметить, что спецификации МК семейства SAM G выпущены ещё компанией Atmel и позиционируются как интеллектуальные флеш МК на базе Arm (Microchip приобрела Atmel в 2016 году).

Маломощные микроконтроллеры семейства SAM L, изготавливаемые по технологии picoPower, ориентированы на применение в устройствах для Интернета вещей, носимых приборах и аксессуарах с малым энергопотреблением. Ключевой особенностью МК SAM L является сверхмалое энергопотребление – 25 мкА/МГц в активном режиме, 100 нА в спящем режиме, что по данным Microchip является наилучшим показателем в своём классе. МК SAM L также характеризуются малым временем пробуждения (1,2 мкс). Содержат периферийные сенсорные контроллеры (PTC), высокоскоростной интерфейс USB и ряд других традиционных для микроконтроллеров устройств. МК SAM L подразделяются на семейства SAM L10, SAM L11/L11-KPH, SAM L21, SAM L22.

МК семейства SAM L10 выполнены на основе процессорного ядра Arm Cortex-M23 с тактовой частотой 32 МГц, содержат до 64 Кбайт флеш и до 16 Кбайт оперативной памяти SRAM, до трёх модулей SERCOM, три таймера/счётчика, 10-канальный 12-разрядный АЦП, 10-разрядный ЦАП и ряд других аналоговых и цифровых устройств. Микросхемы выпускаются в корпусах TQFP, SSOP, QFN, WLCSP.

Микроконтроллеры семейств SAM L11/L11-KPH на основе Arm Cortex-M23/32 МГц с похожими характеристиками дополнительно оснащены устройствами, поддерживающими технологию Arm TrustZone, предназначенную для защиты устройств Интернета вещей, умных городов, систем

Таблица 3. Классификационные параметры приборов SAM S70

USAR, UART	QSPI	USART, SPI	TWHS	HSMCIпорт/биты	Интерфейс датчиков изображения	SPI0	SPI1	Интерфейс внешней шины (EBI)	Интерфейс SDRAM	Число каналов DMA	SSC	ETM	Число каналов TTC	Число вводов/выводов TTC	Число каналов I2S	Число GPIO	Число каналов 12-бит АЦП	Число АЦП	Число каналов ЦАП
3, 5	Да	3	3	1\4	12-бит	Да	Да	Да	Да	24	Да		12	36	2	114	24	Да	2
3, 5	Да	3	3	1\4	12-бит	Да	Да	Да	Да	24	Да	Да	12	36	2	114	24	Да	2
3, 5	Да	3	3	1\4	12-бит	Да	Да	Да	Да	24	Да	Да	12	36	2	114	24	Да	2
3, 5	Да	3	3	1\4	12-бит	Да	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
3, 5	Да	3	3	1\4	12-бит	Да	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
3, 5	Да	3	3	1\4	12-бит	Да	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
2, 5	SPI	0	2	нет	8-бит	Нет	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1
2, 5	SPI	0	2	нет	8-бит	Нет	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1
2, 5	SPI	0	2	нет	8-бит	Нет	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1

домашней автоматизации, умного сельского хозяйства и приложений для отслеживания активов. Они также обеспечивают безопасное хранение ключей и возможность аутентификации для защиты IP.

Микроконтроллеры семейств SAM L21/L22 выполнены на основе ядра Arm Cortex-M0+/48 МГц (32 МГц), содержат флеш-память до 256 Кбайт, ОЗУ SRAM до 40 Кбайт, до шести модулей SERCOM, до восьми таймеров/счётчиков, интерфейс USB, до 20 каналов 12-разрядных АЦП, двухканальные 12-разрядные ЦАП и ряд других аналоговых (ОУ, компараторы) и цифровых устройств. МК SAM L22 оснащены контроллерами сегментированных ЖК-индикаторов с поддержкой до 320 сегментов, а также устройствами для обнаружения несанкционированного доступа. Энергопотребление микросхем менее 35 мкА/МГц в активном режиме, корпуса QFP, QFN, WKCSP.

Высокопроизводительные микроконтроллеры общего назначения семейств SAME70/S70/V70/V71 выполнены на базе 32-разрядного RISC процессорного ядра Arm Cortex-M7/300 МГц. В состав семейства входит более трёх десятков типов микросхем, классификационные параметры приборов SAM S70 приведены в табл. 3, SAM V70 – в табл. 4, SAM V71 – в табл. 5, SAM E70 – в табл. 6, основные особенности и характеристики МК:

- встроенный стабилизатор напряжения;
- кварцевые или керамические резонаторы: от 3 МГц до 20 МГЦ для системного генератора, 12 МГц или 16 МГц для обеспечения работы через USB, 32 768 кГц для часов и других устройств;
- до 2048 Кбайт флеш-памяти, до 384 Кбайт ОЗУ SRAM, 16 Кбайт ПЗУ с программированием через интересы UART и USB;
- 16-разрядный контроллер статической памяти SMC с поддержкой

Таблица 4. Классификационные параметры приборов SAMV70

Прибор	Флеш, КБ	SRAM, КБ	Число выводов	Корпус	USB	USAR, UART	QSPI	USART, SPI	TWHS	HSMCI-порт/биты	CAN-FD	Интерфейс MediaLB	Интерфейс датчиков изображения
SAMV70Q19	512	256	144	LQFP, TFBGA	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	Да	12-бит
SAMV70Q20	1024	384	144	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	Да	12-бит
SAMV70Q21	2048	384	144	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	Да	12-бит
SAMV70N19	512	256	100	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	Да	12-бит
SAMV70N20	1024	384	100	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	Да	12-бит
SAMV70N21	2048	384	100	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	Да	12-бит
SAMV70J19	512	256	64	LQFP	FS	2, 3	SPI	0	2	Нет	1	Нет	8-бит
SAMV70J20	1024	384	64	То же	FS	2, 3	SPI	0	2	Нет	1	Нет	8-бит
SAMV70J21	2048	384	64	То же	FS	2, 3	SPI	0	2	Нет	1	Нет	8-бит

Таблица 5. Классификационные параметры приборов SAMV71

Прибор	Флеш, КБ	SRAM, КБ	Число выводов	Корпус	USB	USAR, UART	QSPI	USART, SPI	TWHS	HSMCI-порт/биты	CAN-FD	Ethernet AVB	Интерфейс MediaLB	Интерфейс датчиков изображеения
SAMV71Q19	512	256	144	LQFP, TFBGA	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	MII, RMII	Да	12-бит
SAMV71Q20	1024	384	144	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	То же	Да	12-бит
SAMV71Q21	2048	384	144	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	То же	Да	12-бит
SAMV71N19	512	256	100	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	То же	Да	12-бит
SAMV71N20	1024	384	100	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	То же	Да	12-бит
SAMV71N21	2048	384	100	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	То же	Да	12-бит
SAMV71J19	512	256	64	LQFP	FS	2, 3	SPI	0	2	Нет	1	RMII	Да	8-бит
SAMV71J20	1024	384	64	То же	FS	2, 3	SPI	0	2	Нет	1	То же	Да	8-бит
SAMV71J21	2048	384	64	То же	FS	2, 3	SPI	0	2	Нет	1	То же	Да	8-бит

Таблица 6. Классификационные параметры приборов SAM E70

Прибор	Флеш, КБ	SRAM, КБ	Число выводов	Корпус	USB	USAR, UART	QSPI	USART, SPI	TWHS	HSMCI-порт/биты	CAN-FD	Ethernet AVB	Интерфейс датчиков изображения
SAME70Q19	512	256	144	LQFP, TFBGA, UFBGA	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	MII, RMII	12-бит
SAME70Q20	1024	384	144	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	то же	12-бит
SAME70Q21	2048	384	144	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	то же	12-бит
SAME70N19	512	256	100	LQFP, TFBGA	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	то же	12-бит
SAME70N20	1024	384	100	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	то же	12-бит
SAME70N21	2048	384	100	То же	HS	3, 5	Да	3	3	1\4	2	то же	12-бит
SAME70J19	512	256	64	LQFP	FS	2, 3	SPI	0	2	Нет	1	RMII	8-бит
SAME70J20	1024	384	64	То же	FS	2, 3	SPI	0	2	Нет	1	то же	8-бит
SAME70Q21	2048	384	64	То же	FS	2, 3	SPI	0	2	Нет	1	то же	8-бит

Рис. 6. Внешний вид платы контроллера устройств LAN925x

SRAM, PSRAM, NOR и NAND флеш ЗУ, 16-разрядный контроллер интерфейса динамической памяти SDRAMC объёмом до 256 Мбайт;

- 32-разрядный таймер реального времени RTT с малым энергопотреблением;
- различные режимы энергосбережения;
- обширный набор периферийных интерфейсов: Ethernet MAC (GMAC) 10/100 Мбит/с, высокоскоростной (480 Мбит/с) USB 2.0 хост/устройство, 12-разрядный ISI (Image Sensor Interface) по стандарту ITU-R BT. 601/656, CAN-FD, USART0/1/2, LIN, IrDA, RS-485, SPI, I2C, QSPI (Quad I/O Serial Peripheral Interface), SSC (Serial Synchro's Controller) с поддержкой I^2S, TDM и ряд интерфейсов для промышленных, медицинских, ауди, автомобильных и других приложений;
- криптография: генератор случайных чисел TRNG, AES-ключи (256, 192, 128 бит), совместимые со спецификациями FIPS PUB-197;
- до 114 линий ввода/вывода GPIO;
- напряжение питания от 3 В до 3,6 В и от 1,7 В до 3,6 В для промышленных приложений;
- шесть типов корпусов с числом выводов 64, 100, 144.

В помощь разработчикам решений на основе МК Microchip компания выпускает широкую номенклатуру отладочных плат (комплектов) различных устройств для автомобильной и потребительской электроники, IoT-изделий, медицинских приборов, человеко-машинных интерфейсов,

	SPI0	SPI1	Интерфейс внешней шины (EBI)	Интерфейс SDRAM	Число каналов DMA	SSC	ETM	Число каналов TTC	Число вводов/выводов TTC	Число каналов I^2S	Число GPIO	Число каналов 12-бит АЦП	Число АЦП	Число каналов ЦАП
	Да	Да	Да	Да	24	Да		12	36	2	114	24	Да	2
	Да	Да	Да	Да	24	Да	Да	12	36	2	114	24	Да	2
	Да	Да	Да	Да	24	Да	Да	12	36	2	114	24	Да	2
	Да	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
	Да	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
	Да	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
	Нет	Нет	нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1
	Нет	Нет	нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1
	Нет	Нет	нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1

	SPI0	SPI1	Интерфейс внешней шины (EBI)	Интерфейс SDRAM	Число каналов DMA	SSC	ETM	Число каналов TTC	Число вводов/выводов TTC	Число каналов I^2S	Число GPIO	Число каналов 12-бит АЦП	Число АЦП	Число каналов ЦАП
	Да	Да	Да	Да	24	Да	Да	12	36	2	114	24	Да	2
	Да	Да	Да	Да	24	Да	Да	12	36	2	114	24	Да	2
	Да	Да	Да	Да	24	Да	Да	12	36	2	114	24	Да	2
	Да	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
	Да	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
	Да	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
	Нет	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1
	Нет	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1
	Нет	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1

	SPI0	SPI1	Интерфейс внешней шины (EBI)	Число каналов DMA	SSC	ETM	Число каналов TTC	Число вводов/выводов TTC	Число каналов I^2S	Число GPIO	Число каналов 12-бит АЦП	Число АЦП	Число каналов ЦАП
	Да	Да	Да	24	Да	Да	12	36	2	114	24	Да	2
	Да	Да	Да	24	Да	Да	12	36	2	114	24	Да	2
	Да	Да	Да	24	Да	Да	12	36	2	114	24	Да	2
	Да	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
	Да	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
	Да	Нет	Нет	24	Да	Да	12	9	1	75	10	Да	2
	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1
	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1
	Нет	Нет	Нет	24	Да	Да	12	3	0	44	5	Да	1

устройств связи, промышленности и машинного обучения. Рассмотрим особенности некоторых отладочных плат, предназначенных для промышленных приложений.

Для отработки устройств передачи файлов через сеть EtherCAT (FoE) компания выпускает отладочные платы (комплекты) на основе МК SAM D51, SAM D53, SAM E53.

Технология File over EtherCAT (FoE), разработанная компанией Beckhoff Automation GmbH (Германия), обычно используется в приложениях промышленной автоматизации и представляет собой простой протокол, обеспечивающий доступ к файлам на устройствах и унифицированную загрузку на них прошивок по сети EtherCAT. Этот протокол поддерживает программы загрузки без использования стека TCP/IP, что позволяет обновлять ПО устройств в полевых условиях без специальных сервисных кабелей и привлечения сторонних специалистов.

Структурная схем отладочных комплектов для FoE показана на рис. 1, внешний вид платы контроллера устройств LAN925x показан на рис. 6. В ассортименте компании представлено несколько отладочных комплектов (EVB – Evaluation Board) для FoE, рассчитанных на работу с различными МК SAM (EVB-LAN9252, EVB LAN9253, EVB-LAN9255), выполненными на основе соответствующих микросхем (LAN9252, LAN9253, LAN9255).

Компания также предлагает отладочные комплекты для других промышленных приложений: устройств управления двигателями (3-фазными и бесконтактными BLDC), интеллектуальных IoT-мониторов объектов, устройств наблюдения за движением, сетевых TCP/IP приложений, мостов USB в UART, сварочных аппаратов и других.

Литература

1. URL: https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors.

Гибкие миниатюрные радиочастотные соединители FMC для печатных плат

Кива Джуринский

Рассмотрены конструкция и параметры соединителей FMC с предельной частотой 10 ГГц, предназначенных для поверхностного монтажа на микрополосковые печатные платы и соединения печатных плат между собой в ограниченном пространстве при минимальном расстоянии между ними 6,05 мм. Описан новый способ соединения внутренних проводников вилки и розетки взамен традиционного соединения штырь – гнездо с ламелями, обеспечивающий повышение надёжности соединителей.

1. Соединители SMP и Mini-SMP

Необходимость миниатюризации и повышения плотности компоновки компонентов модулей СВЧ для телекоммуникаций, авиации и военного применения приобретает всё бóльшую актуальность. Все компоненты, устанавливаемые на печатные платы, должны иметь минимально возможные размеры и быть пригодными для сборки по технологии поверхностного монтажа. Многие классические радиочастотные соединители уже не удовлетворяют этим требованиям и стали сдерживающим фактором для систем с высокой скоростью передачи сигналов и широкополосной связи.

Для решения этой проблемы были разработаны коаксиальные соединители для соединения плат между собой, наиболее известными из которых являются миниатюрные защёлкиваемые (push-on, snap-on) соединители SMP и Mini-SMP (рис. 1) [1].

Предельная рабочая частота соединителей SMP и Mini-SMP соответственно 40 и 50 ГГц. Соединители обеспечивают необходимое согласование параметров в сочетании с возможностью поверхностного монтажа на платы. Соединение наружных проводников вилки и розетки может быть трёх видов: полное защёлкивание, ограниченное защёлкивание и скользящее соединение, при этом соединение внутренних проводников стандартное: штырь – гнездо с ламелями.

Диаметры гнездового проводника розетки соединителей SMP и Mini-SMP равны 0,85 мм и 0,75 мм соответственно. Диаметр штыря ответной вилки – всего 0,40 мм для соединителя SMP и 0,32 мм для соединителя Mini SMP. Поэтому, чтобы не допустить повреждения миниатюрных центральных контактов при соединении вилки и розетки, необходимо обеспечить жёсткие требования к допускам и соосности их размеров.

Велика вероятность повреждения и в случае несоосного вхождения штыря вилки в гнездо розетки, если не соблюдены жёсткие допуски на позиционирование при сопряжении. Естественно, что очень жёсткие допуски на размеры повышают стоимость этих соединителей.

Ещё одно соображение, которое необходимо учитывать, – ограниченный допуск на осевую несоосность соединителей, установленных на каждой из соединяемых плат (соединение плата–плата). Платы соединяются при помощи адаптера вилка–вилка «bullet» (рис. 2) [1].

На одной из печатных плат устанавливают соединитель-вилку со скользящим соединением, а на противоположной плате – соединитель-вилку с полным или ограниченным защёлкиванием. Такое простое и экономичное соединение позволяет выравнивать смещение плат в осевом направлении до 0,25 мм. При этом максимальное радиальное отклонение $X = L \times \sin \alpha$, мм, где α – максимальный угол отклонения, равный 4°, L – длина «bullet», мм [2].

При угловом и радиальном смещениях плат на ламели гнездового контакта розетки воздействует высокая механическая нагрузка. Поскольку толщина стенок этих ламелей не превышает 0,20 мм, слишком большое смещение может привести к разрушению ламелей гнезда или изгибу и поломке ответного штыря вилки соединителей.

Серьёзным недостатком такого соединения является изменение импеданса в интерфейсе «bullet» – соединители SMP на платах в зависимости от расстояния между платами [3]. На более высоких частотах это оказывает влияние на повторяемость параметров соединения.

2. Концепция создания соединителей FMC

За основу была взята традиционная, хорошо зарекомендовавшая себя схема соединения печатных плат, применённая для соединителей SMP: соединитель-вилка со скользящим соединением на одной из печатных плат, соединитель-вилка с пол-

Рис. 1. Соединители SMP и Mini-SMP

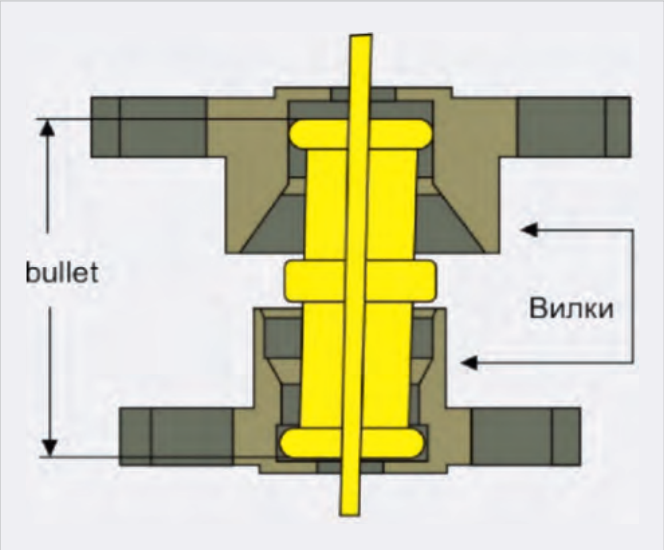


Рис. 2. Соединение двух плат при помощи адаптера «bullet»

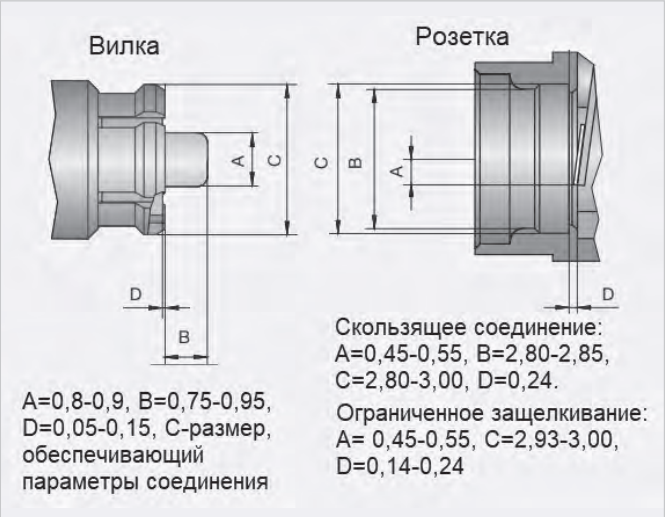


Рис. 3. Схема соединения вилки и розетки и размеры, мм, соединителей FMC

ным или ограниченным защёлкиванием на противоположной плате и адаптер вилка–вилка «bullet» между ними. Для устранения вышеперечисленных проблем, выявленных при применении соединителей SMP, компания Rosenberger в 2004 году разработала серию так называемых «гибких» микрополосковых соединителей FMC (аббревиатура от Flexible Microstrip Connector) [2–8].

Основная идея при создании этих соединителей заключалась в устранении цангового контакта штырь-вилка – гнездо розетки со всеми его механическими и электрическими ограничениями. Другая идея – использование подпружиненного контакта розетки для компенсации осевого смещения при соединении вилки и розетки. Схема соединения и основные размеры соединителей FMC приведены на рис. 3 [4].

Для реализации этих идей центральный контакт соединителя FMC–розетка был выполнен в виде упругой изогнутой металлической пластинки, закреплённой в латунном корпусе с помощью изолятора из LCP (Liquid Cristal Polymer). Нижняя сторона пластинки соединяется низкотемпературной пайкой с микрополосковой линией печатной платы, образуя надёжный переход от коаксиальной к микрополосковой линии с контролируемым импедансом (рис. 4) [4, 5]. Другой конец металлической пластинки, изготовленной из термоупрочнённой бериллиевой бронзы, соединяется со скруглённым на концах центральным проводником адаптера «bullet» (рис. 5) [4, 6]. В области соединения на поверхности металлической

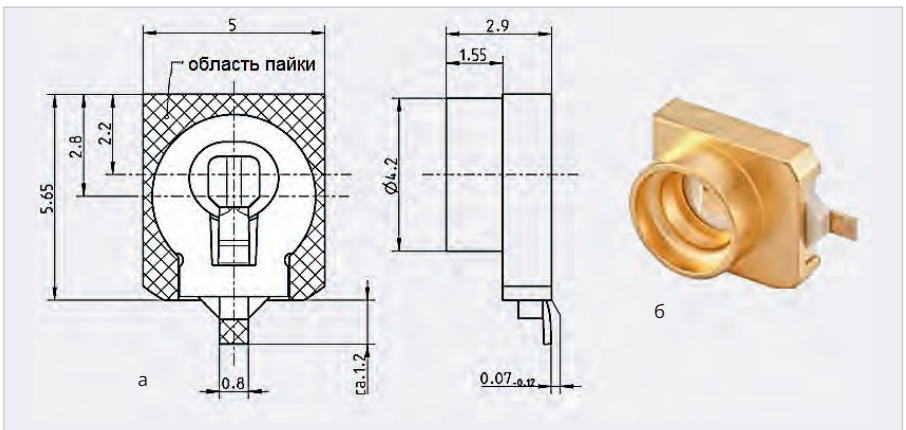


Рис. 4. Конструкция (а) и внешний вид (б) соединителя FMC–розетка для поверхностного монтажа

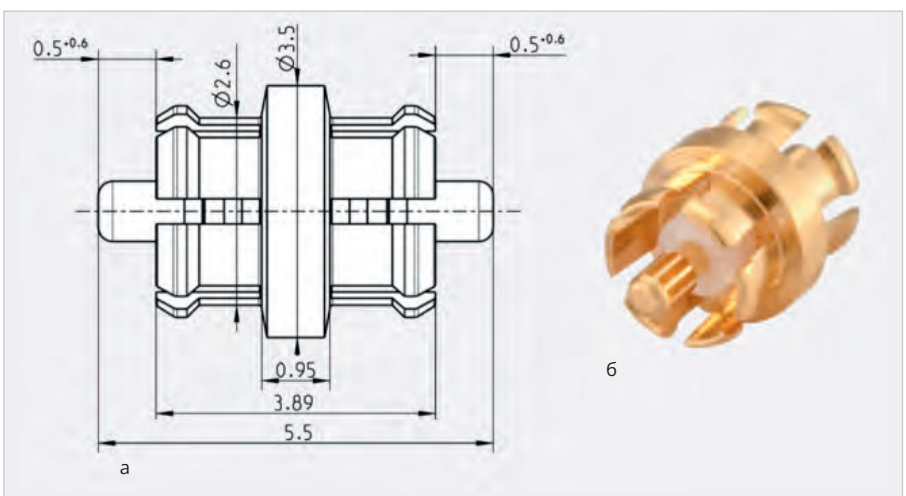


Рис. 5. Конструкция (а) и внешний вид (б) адаптера «bullet» FMC

пластинки выполнено углубление, обеспечивающее многоточечный переход с низким сопротивлением. Благодаря сферической форме центрального проводника адаптера «bullet» соединение может без повреждения смещаться в угловом и радиальном направлениях. Смещение в осевом направлении выравнивается за счёт перемещения металлической пластинки соединителя-розетки, в то время как центральный проводник соединителя-вилки, закреплённый во фторопластовом изоляторе, имеет ограниченное смещение.

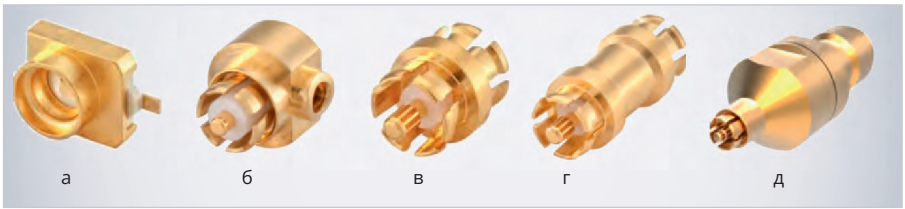


Рис. 6. Соединители FMC: 16P101-40ML4 и 16P141-40ML4 (а), 16S201-270L5 и 16S201-271L5 (б), 16S101-S00L5 (в), 16S102-S00L5 (г), 16S 132-K00 L5 (д) несколькими способами

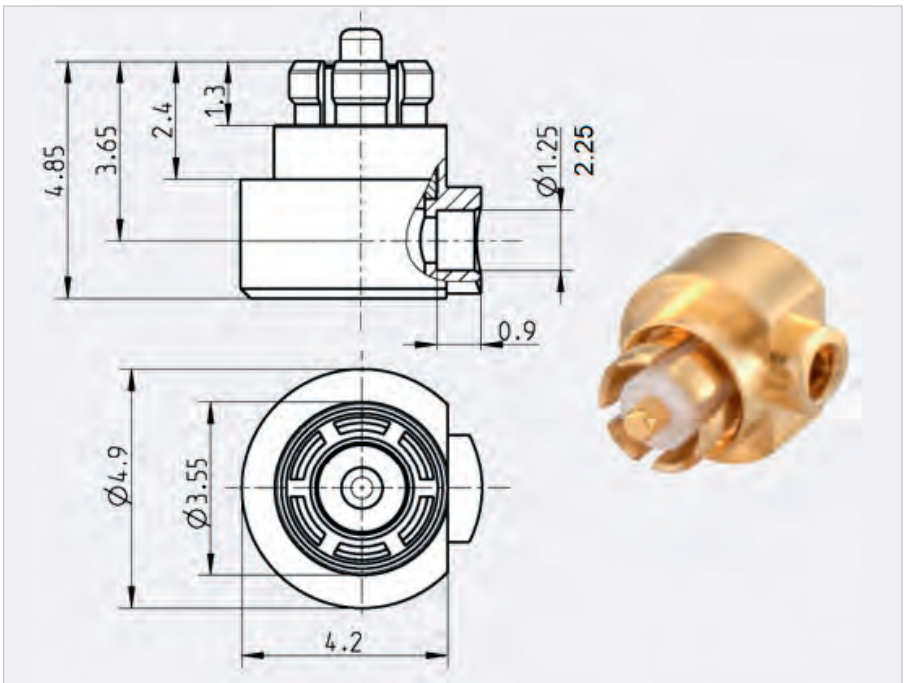


Рис. 7. Конструкция (а) и внешний вид (б) кабельных соединителей FMC

В результате центральные проводники находятся при постоянном давлении, создаваемом подпружиненной металлической пластинкой.

Гибкую пластинку соединителя-розетки изготавливают прецизионным формованием и штамповкой. Это гарантирует высокий уровень точности и низкие производственные затраты при серийном производстве. Корпус адаптера изготавливают из упрочнённой бериллиевой бронзы, центральный проводник – из латуни, изолятор – из фторопласта. Покрытие металлических деталей: AuroDur (золото толщиной 2…3,5 мкм по подслою химического никеля).

3. Серия соединителей FMC

Серия соединителей FMC состоит из двух соединителей-розеток для поверхностного монтажа: 16P101-40ML4 (для соединения с ограниченным защёлкиванием) и 16P141-40ML4 (для скользящего соединения), двух угловых кабельных соединителй 16S201-270L5 и 16S201-271L5, двух адаптеров вилка–вилка «bullet»: 16S101-S00L5 длиной 6,35 мм и 16S102-S00L5 длиной 10,35 мм и адаптера 16S132-K00 L5 FMC-вилка – SMA-розетка (рис. 6) [4]. Соединители FMC поставляются в упаковке из ленты, намотанной на катушку, для автоматического размещения на печатной плате.

Угловые кабельные соединители предназначены для сочленения с соединителями-розетками ограниченным защёлкиванием или скольжением. При этом для розеток с разным видом соединения используется один и тот же кабельный соединитель (рис. 7) [4, 7].

Кабельные соединители 16S201-270L5 предназначены для работы с полужёстким кабелем UT47 диаметром 0,47 дюйма (1,19 мм), 16S201-271L5 – с кабелем UT86 диаметром 0,86 дюйма (2,2 мм). Монтаж соединителя на кабель производят низкотемпературной пайкой. Корпуса кабельных соединителей изготовлены из упрочнённой бериллиевой бронзы, центральный проводник – из латуни, изолятор – из фторопласта. Покрытие металлических деталей – золото толщиной 0,15 мкм по подслою химического никеля.

4. Параметры соединителей FMC

Типичные параметры соединителей FMC приведены в табл. 1 [4].

Для каждого конкретного соединителя FMC они могут несколько отличаться, точные значения приведены в data sheet. По данным работы [3], соединители FMC могут иметь приемлемые параметры согласования на частотах до 20 ГГц, однако их гарантированная рабочая частота ограничена 10 ГГц.

5. Результаты сравнения основных параметров соединителей FMC и аналогов

Компания Rosenberger разработала радиочастотные коаксиальные соединители нескольких типов для поверхностного монтажа на печатные платы: SMP, Mini-SMP, P-SMP, Longwipe-SMP и FMC. Основные параметры этих соединителей приведены в табл. 2 [4, 9].

Основной вывод, который можно сделать в результате анализа этих данных, – явное занижение некоторых основных параметров соединителей FMC. Компания Rosenberger, видимо, решила подстраховаться, так как это был её первый опыт разработки соединителей для поверхностного монтажа без традиционного соединения штырь – гнездо с ламелями. Прежде всего, это малое количество соединений и рассоединений вилки и розетки – 100. Для соединителей SMP оно равно 500 (ограниченное защёлкивание) и 1000 (скользящее соединение) [9]. При этом в соединителях SMP диаметр центрального штыревого проводника всего 0,4 мм, а в соединителях FMC – 0,8 мм, и к тому же нет цангового центрального проводника розетки. По-видимому, низкое количество соединений и рассоединений обусловлено опасением потери упругости термоупрочнённой бериллиевой бронзы, из которой изготовлена пластинка центрального проводника розетки, и нарушением вследствие этого контакта в соединении вилки и розетки. Также по этой же причине максимально допустимая осевая несоосность для соединителей FMC ограничена: всего ±0,3 мм, что меньше более чем в 2 раза по сравнению с соединителями

Longwipe-SMP и в 3 раза – с соединителями P-SMP.

Вероятно, по этой же причине допустимая пропускаемая мощность соединителей FMC всего 50 Вт на частоте 2,2 ГГц. Этот показатель для соединителей SMP приблизительно в 3 раза, а для соединителей P-SMP – в 4 раза больше.

Соединители FMC превосходят все другие соединители для поверхностного монтажа на микрополосковые платы только по возможности соединять платы, отстоящие друг от друга на расстоянии всего 6,05 мм. Поэтому, если позволяет диапазон рабочих частот, соединители FMC наилучшим способом подходят для применения в устройствах с ограниченным пространством. Не менее важным является низкая стоимость этих соединителей, наименьшая по сравнению с соединителями, представленными в табл. 2.

Заключение

Соединители FMC были одними из первых соединителей упрощённой конструкции, без стандартного соединения штырь – гнездо с ламелями. Задолго до их создания были разработаны миниатюрные соединители SMP, которые постоянно совершенствовали, доведя их предельную частоту до 100 ГГц в результате уменьшения размеров коаксиальной линии [9]. При этом допустимая передаваемая СВЧ мощность уменьшалась до нескольких десятков и даже единиц ватт, повышалась повреждаемость соединителей и снижалась их надёжность.

Однако, несмотря на это, соединение двух плат с применением адаптера «bullet» оказалось настолько технологичным и привлекательным, что зарубежные компании продолжали разрабатывать всё новые соединители специально для печатных плат, сохранив незыблемым принцип соединения защёлкиванием. Размеры коаксиальной линии соединителей пришлось увеличить, что повлекло за собой увеличение допустимой пропускаемой мощности, но привело к значительному уменьшению диапазона рабочих частот. Это и есть «путь назад: от высоких к низким частотам», как указано в подзаголовке этой статьи.

Таблица 1. Параметры соединителей FMC

Электрические параметры	Значение параметра
Волновое сопротивление	50 Ом
Диапазон рабочих частот	0...10 ГГц
КСВН в рабочем диапазоне частот	Не более 1,15
Вносимые потери в зависимости от частоты f, ГГц	≤ 0,1×√f, дБ
Сопротивление изоляции	Более 5 ГОм
Сопротивление центрального контакта	≤ 6 мОм
Сопротивление наружного контакта	≤ 2 мОм
Рабочее напряжение	335 В
Рабочий ток	1,2 А
Испытательное напряжение	500 В
Допустимая пропускаемая мощность на частоте 2,2 ГГц	50 Вт
Экранное затухание в диапазоне частот	≥ 80 дБ (0...3 ГГц), ≥ 65 дБ (3...10 ГГц)
Рабочий диапазон температур. Максимальная температура при пайке	–40...+105°С 250°С
Механические параметры	Значение параметра
Гарантированное количество соединений и рассоединений вилки и розетки	Более 100
Усилие соединения	≤ 45 Н (ограниченное защёлкивание) ≤ 9 Н (скользящее соединение)
Усилие рассоединения	> 9 Н (ограниченное защёлкивание) ≥ 2,2 Н (скользящее соединение)
Аксиальное смещение	± 0,3 мм
Радиальное смещение	4°
Расстояние между соединяемыми платами	6,05 мм (без учёта толщины припойной пасты)

Таблица 2. Основные параметры соединителей для поверхностного монтажа

Параметр	Соединители				
	SMP	Mini-SMP	P-SMP	Longwipe-SMP	FMC
Предельная рабочая частота, ГГц	40	65	10	6	10
Допустимая пропускаемая мощность на частоте 2,2 ГГц, Вт	~160	~100	200	100	50
Минимальное расстояние между соединяемыми платами, мм	9,05	7,9	12,6	9,25	6,05
Максимально допустимая осевая несоосность, мм	±0,3	±0,25	±1,0	±0,7	±0,3
Максимально допустимая радиальная несоосность, градусы	4	4	3	4	4
Гарантированное количество соединений и рассоединений вилки и розетки	500	500	500	500	100

Литература

1. *Джуринский К., Сотников А.* Эволюция радиочастотных соединителей для электроники СВЧ. В поиске компромиссных решений. Часть 2. Соединители SMP // СВЧ-электроника. 2017. № 2. С. 30–35.
2. Board-to-Board Connectors – Rosenberger Group // URL: www.rosenberger.com.
3. A Flexible Microstrip Connector // Microwave Journal. 2006. March 1.
4. The Extremely Small FMC Connector Series – Rosenberger // URL: https://rosenberger.com/0_documents/de/catalogs/ba_communication/catalog_coax/03_Chapter_FMC.pdf.
5. URL: https://www.microwavejournal.com/articles/1065-a-flexible-microstrip-connector.
6. URL: https://www.micro-semiconductor.com/datasheet/60-16S101-S00L5.pdf.
7. URL: https://www.micro-semiconductor.com/datasheet/60-16S101-S00L5.pdf.
8. Flexible Microstrip Connectors – compensate misalignments // EDN. 2004. № 4.
9. *Джуринский К.Б.* Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры / под ред. д.т.н. А.А. Борисова. СПб.: Файнстрит, 2014.

Тиристор со статической индукцией с повышенным быстродействием

Юрий Максименко, Виктория Грабежова (ООО «Дизайн-центр биомикроэлектронных технологий "Вега"»), **Александр Гордеев** (ООО «АГАТ»)

Рассматривается конструкция кристалла тиристора со статической индукцией с повышенным быстродействием. Повышение быстродействия достигается за счёт отключения от области затвора его пассивных частей, расположенных под площадками катода, затвора и периферийных областей, а также за счёт исключения инжекции из анода дырок под этими областями путём введения стопора n^+-областей. Дальнейшее уменьшение области затвора и, соответственно, повышение быстродействия обеспечивается за счёт уменьшения шага структуры кристалла в четыре раза. Уменьшение шага структуры кристалла достигается использованием новой технологической схемы формирования структуры кристалла, объединяющей Trench-технологию и технологию самосовмещения истока и затвора. Замена n^+-областей катода на изотипный гетеропереход позволит проводить глубокую модуляцию высокоомной области анода основными носителями, что, в свою очередь, позволит увеличить рабочее напряжение тиристора до 10 кВт и выше и уменьшить сопротивление прибора в открытом состоянии на несколько порядков.

Введение

Сегодня с быстрым развитием электрифицированных отраслей, таких как электротранспорт, самолётостроение, средства электропитания и т.д., очень актуальным становится создание эффективных силовых ключей. Ключевые высоковольтные тиристоры из-за наличия на пути протекания тока трёх p-n-переходов и низкого быстродействия не отвечают современным требованиям по статическим и динамическим потерям. Зарубежные полупроводниковые компании при построении высоковольтных ключей активно переходят на широкозонные материалы (SiC). В России из-за отсутствия технологий по созданию широкозонных материалов SiC работы по созданию таких приборов находятся на начальных этапах.

Транзисторы со статической индукцией (СИТ) с планарным затвором с доработанной конструкцией способны работать на частотах до 10 мГц при рабочих напряжениях 500–1200 В [1].

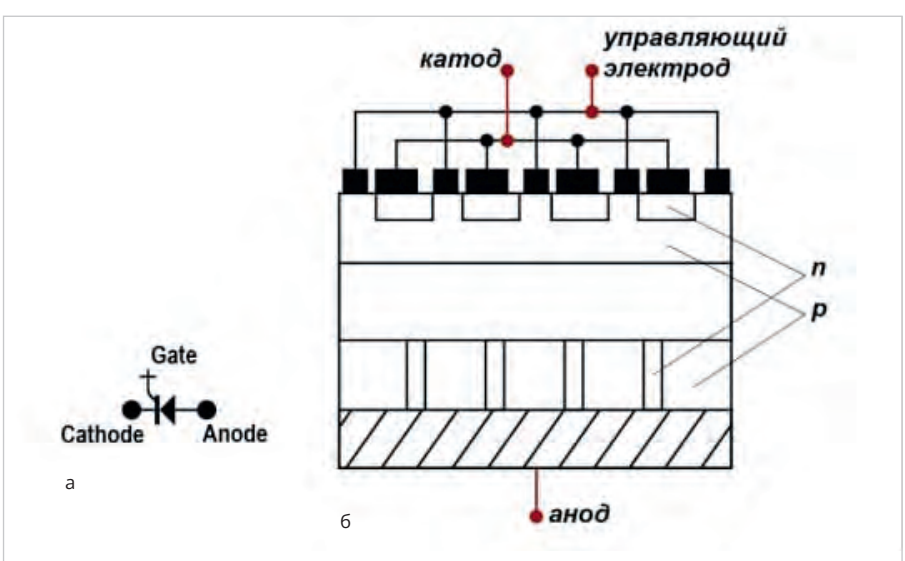


Рис. 1. Выключаемый тиристор: а) условное обозначение; б) структурная схема

В этом диапазоне рабочих напряжений они имеют очень низкое сопротивление канала и высокое быстродействие. Дальнейшее повышение рабочего напряжения требует увеличения ширины высокоомной области стока. Это приводит к существенному росту сопротивления канала и снижению быстродействия, так как модуляция канала неосновными носителями – дырками из затвора, из-за их низкой подвижности, на большую глубину происходит медленно и неэффективно. Поэтому при рабочих напряжениях выше 1500 В наиболее эффективно применять тиристоры.

Тиристор – это прибор, у которого низкоомная подложка имеет p^+-область. В открытом состоянии прибора из подложки в канал впрыскиваются неосновные носители и эффективно модулируют его.

Первые управляемые тиристоры появились в 1955 г., когда стало возможным получение кремния высокой чистоты. Они имели четырёхслойную структуру и получили название «тиристор». Он включался подачей импульса на электрод управления при положительном напряжении между анодом и катодом. Выключение тиристора обеспечивается снижением протекающего через него прямого тока до нуля. Это требует дополнительно большого количества элементов, что увеличивает стоимость и массо-габариты [2].

Следующее развитие тиристор получил в 1960 г., когда в США был разработан прибор, способный запираться с помощью управляемого электрода, и получил название Gate Turn Off (GTO) – выключаемый тиристор. Выключаемый тиристор – полностью управляемый полупроводниковый прибор. Включение и выключение происходит путём подачи положительного и отрицательного, соответственно, импульса на электрод управления. На рис. 1 приведены условное обозначение (а) и структурная схема (б) выключаемого тиристора [2].

В середине 90-х годов был разработан новый вид тиристоров Gate

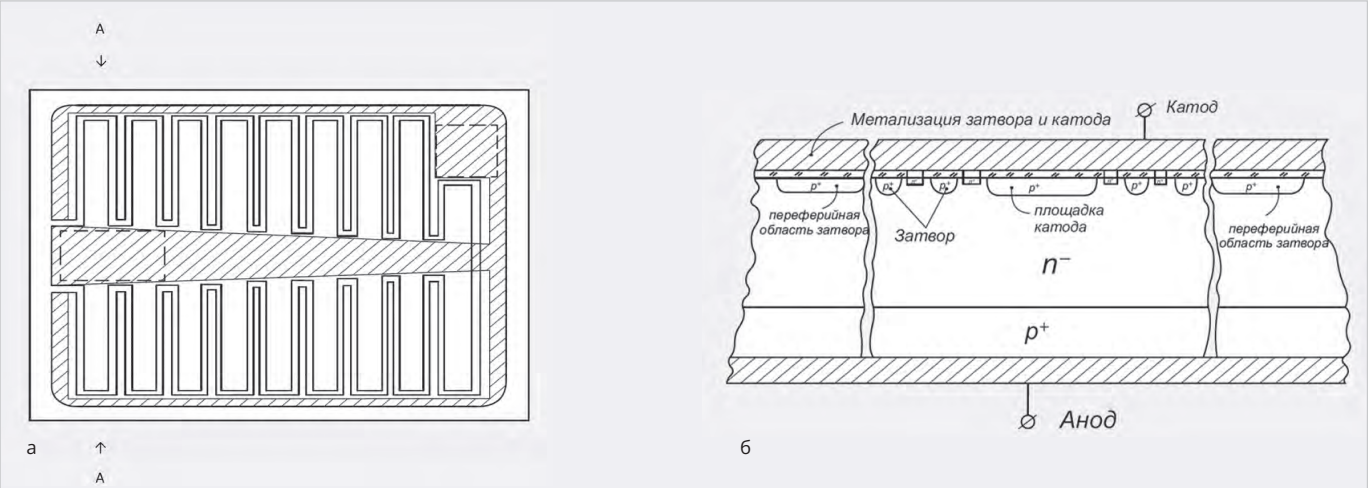


Рис. 2. Кристалл ТЭУ: а) вид сверху (заштрихованные области – паразитные области катода, затвора и периферии); б) разрез сверху вниз через площадку катода (А–А)

Commutated Thyristor (GCT). Он является дальнейшим усовершенствованием GTO и лишён его недостатков. Далее развитие тиристоров пошло по пути создания жёсткого управления – создание драйверов, совмещённых с пластинами охлаждения (англ. Integrated Gate – Commutated Thyristor (IGCT)) [3].

Быстрое развитие в начале 90-х годов технологии силовых транзисторов привело к появлению нового класса приборов – биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistors). Основными преимуществами IGBT являются высокое значение рабочей частоты (20...30 кГц), КПД, простота в управлении. В последние годы IGBT потеснили тиристоры GTO в устройствах мощностью 1 МВт и напряжением до 3,5 кВ.

Первый тиристор со статической индукцией (ТЭУ) был изобретён И. Нишизавой в 1975 году [4]. Он, как и первые СИТ, имел заглублённый затвор. Заглублённый затвор имеет недостаток – большое сопротивление. Это ограничивает высокочастотные свойства прибора и не позволяет вводить прибор в биполярный режим работы. В 1982 году Й. Накамура предложил конструкцию ТЭУ с планарным затвором [5], свободную от этого недостатка. Однако обе эти конструкции обладают ещё одним негативным свойством: у них в открытом состоянии инжекция неосновных носителей из области затвора происходит по всей площади затвора и на периферии. При выключении тиристора неосновные носители в канале выводятся гораздо быстрее, чем на периферии и под площадками катода и затвора (рис. 2).

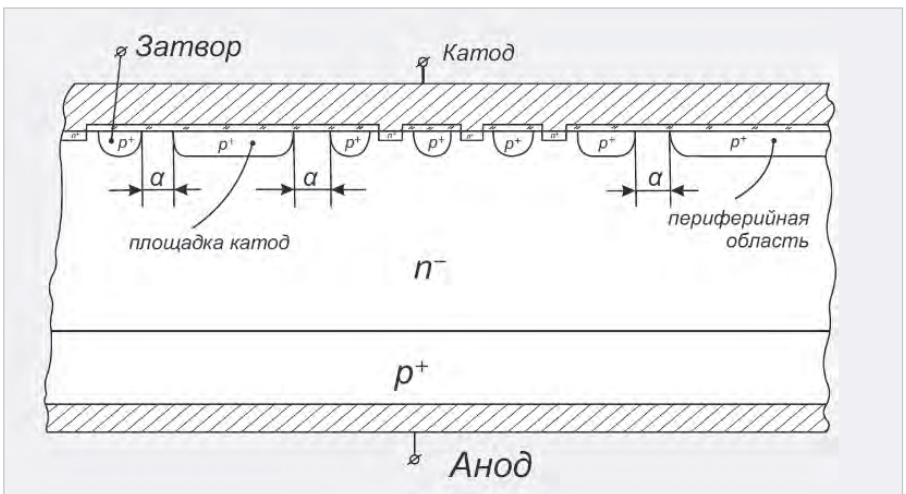


Рис. 3. Разрез кристалла ТЭУ с отключёнными паразитными областями

Это приводит к затягиванию выключения и ограничивает быстродействие.

Тиристоры с электростатическим управлением имеют преимущество по остаточному напряжению перед биполярными тиристорами и приборами IGBT, так как на пути протекания тока имеют один p-n-переход, а не три, и, соответственно, падение напряжения на них в открытом состоянии меньше. Также они более скоростные, потому что удаление неосновных носителей происходит через затвор. В IGBT, после закрытия входного МОП-транзистора, цепь эмиттер-коллектор прерывается, и неосновные носители медленно рекомбинируют в базовой области, что затягивает выключение.

Автором данной работы предложена конструкция ТЭУ, свободная от недостатков конструкций, описанных в [4, 5]. Для исключения «паразитной» инжекции дырок из затвора под площадками катода, затвора и периферийных областей последние отключаются от области затвора высокоомной n^--областью стока (рис. 3). Причём расстояние *a* между затвором и областями под площадками и периферией должно быть как можно больше, но не более значения, при котором происходит преждевременный поверхностный лавинный пробой. Отключение этих областей от затвора имеет ещё один положительный момент – уменьшается ёмкость затвора. При увеличении напряжения на тиристоре происходит смыкание ОПЗ этих областей и подключение к ёмкости затвора ёмкостей отключённых областей, поэтому *a* должно быть как можно больше. Правда, их подключение происходит через высокоомный резистор, и увеличение ёмкости затвора незначительно.

Для исключения «паразитной» инжекции дырок из анода между n^-- и p^+-областями анода в местах под площадками и на периферии формируется стопорный слой n^+ (рис. 4). Этот слой не даёт инжекции дырок в этих местах.

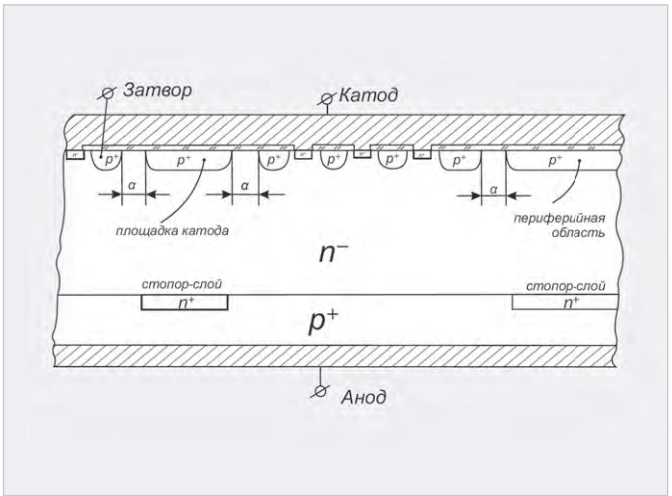


Рис. 4. Разрез кристалла ТЭУ со «стопор»-областью

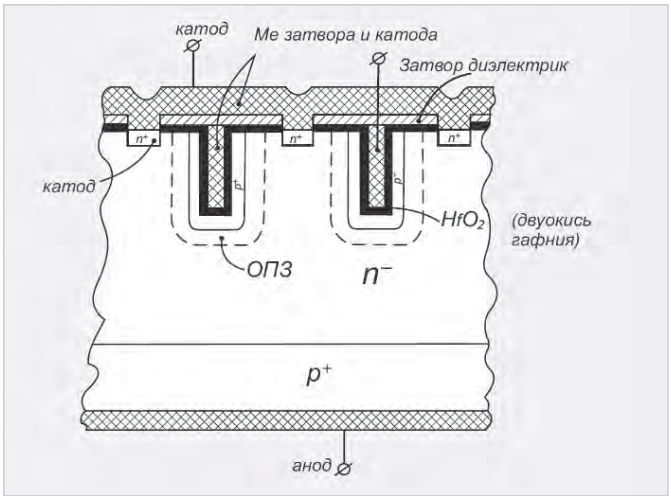


Рис. 5. Разрез кристалла ТЭУ с МОП полевым управлением [7]

В современных тиристорах между n^-- и p^+-областями есть стопорный слой, но он формируется для ограничения ОПЗ и повышения, соответственно, максимального рабочего напряжения. Концентрация примеси в нём невысокая, что не препятствует инжекции дырок из p^+-области в n^--область.

Время переключения тиристора зависит от величины эффективной ёмкости затвора ($C_{вх\ эф}$), которая определяется уравнением:

$$C_{вх\ эф} = C_{зи} + C_{зс}(1 + M^*) + C_{з\ к} + C_{з\ пл}, \quad (1)$$

где M^* – коэффициент усиления;

$C_{з\ к}$ – ёмкость, определяемая неосновными носителями в канале;

$C_{з\ пл}$ – ёмкость, определяемая неосновными носителями под площадками и на периферии.

В линейном приближении

$$T_{пер} = 2{,}2C_{вх\ эф}(R_г + R_з), \quad (2)$$

где $T_{пер}$ – время переключения;

$R_г$ – выходное сопротивление генератора запускающих импульсов;

$R_з$ – сопротивление области затвора транзистора.

Точный расчёт $C_{з\ к}$ и $C_{з\ пл}$ не представляется возможным, но очевидно, что неосновные носители, определяющие их величину в канале и под площадками катода, затвора и на периферии, рассасываются по разным законам: в канале они вытягиваются полем и рекомбинируют с электронами, летящими из катода; под площадками и на периферии – медленно дрейфуют к затвору.

Ясно, что $C_{з\ пл}$ больше всех остальных, и её устранение существенно повышает быстродействие тиристора. Кроме того, отключение «паразитных» областей уменьшит $C_{зи}$ и $C_{зс}$ почти в два раза. Сегодня ТЭУ с такой конструкцией ещё не изготовлены, но ожидается, что при её реализации уменьшение $T_{пер}$ будет более чем на порядок.

Замена n^+-областей катода на изотипный гетеропереход позволит проводить глубокую модуляцию высокоомной области анода основными носителями, что, в свою очередь, позволит увеличить рабочее напряжение тиристора до 10 кВт и выше и снизить сопротивление канала в открытом состоянии на несколько порядков, увеличить быстродействие. Это, в свою очередь, позволит снимать больший ток с единицы площади кристалла.

Данная конструкция ТЭУ является одной из лучших, выполненных на Si. Для её реализации можно использовать хорошо отработанную технологию, описанную в [6]. Однако наиболее интересные конструкции ТЭУ будут на GaAs, так как этот материал имеет подвижность электронов почти в восемь раз выше, и ширина запрещённой зоны больше. Это позволяет создавать более высоковольтные приборы с более высокой скоростью переключения.

Авторами данной работы предложена конструкция для создания ТЭУ на GaAs по технологии Trench на принципе максвелловского «сшивания» пограничных сред [7]. Схематичный разрез кристалла показан на рис. 5.

Тиристор представляет собой ТЭУ с МОП полевым управлением. Подзатворный окисел должен быть выполнен из диэлектрических материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости $\varepsilon ox >> \varepsilon GaAs$, т.е. из комбинаций окислов металлов, таких как Ti, Ta, Hf, Cd и др., с обязательным буферным нанослоем (< 10 нм) широкозонного изолятора. Это не позволит переходить грань плотности поверхностных зарядовых состояний Nss больше чем $3...5{\cdot}10^{11}$см$^{-2}$. В конструкции, приведённой на рис. 5, применён диэлектрик из двуокиси гафния.

Из соотношения Масквелла

$$\varepsilon_1\varepsilon_0 E_1 = \varepsilon_2\varepsilon_0 E_2 \quad (3)$$

следует, что соотношение выделяемого падения напряжения на p-n-переходе и в оксиде гафния определяется как

$$U_{p\text{-}n\text{-}} = (\varepsilon_{Hf02} \cdot U_{Hf02} \cdot W_{p\text{-}n}) / (\varepsilon Si \cdot d_{Hf02}); \quad (4)$$

$$K = U_{p\text{-}n\text{-}} / U_{Hf02} = (\varepsilon_{Hf02} \cdot W_{p\text{-}n}) / (\varepsilon Si \cdot d_{Hf02}), \quad (5)$$

т.е. $K \approx$ от 200 ~ 250. Это говорит о том, что всё приложенное напряжение к затвору будет переходить на p-n-переход.

Плотность заряда инверсного канала несравнимо более высокая, чем в кремниевых JGT и карбид-кремниевых MOSFET, а подвижность электронов в канале, или, точнее говоря, дрейфовая скорость пролёта электронов в i-GaAs-MOSFET, в 20 раз превышает кремниевый дрейф и тем более карбид-кремниевую скорость пролёта. Что же касается «проходных» и «выходных» RC-цепочек, то и здесь преимущество будет за GaAs вследствие того, что выходная ёмкость при нуле смещения как минимум в 30 и в 10 раз меньше, чем в SiC- и Si-MOSFET соответственно (мощность динамических потерь при перезарядке/переключении управляющего драйвера). Сопротивление открытого канала у GaAs-ТЭУ (R_k GaAs) меньше, чем в R_k SiC-MOSFET, так как идёт мощная инжекция носителей из анода.

Катод можно делать как n^+-область либо гетероинжекционным. На рис. 6 и рис. 7 показаны зонные энергетические диаграммы активной истоковой области кремниевого и арсенид-галлиевого ТЭУ с гетероистоком. Принципы работы обеих конструкций одинаковы, а именно: при подаче положительных

потенциалов относительно катода на анодную и затворную активные области происходит инжекция дырочных носителей заряда в зону канала катод-анод с одновременной термоэмиссионной (на начальной стадии) и инжекционной поставкой электронов в канал катод-анод для создания нейтральной проводящей электронно-дырочной плазмы (ЭДП) в n-канале, вследствие чего его проводимость возрастёт на порядки. Но имеются и существенные отличия.

1. На зонной диаграмме видно, что из-за наличия гетероперехода n^+-эпитаксиального слоя резко снижается барьерный потенциал $\varphi_{p\text{-}n}$ затвор-катод, а это означает резкое снижение динамических потерь при подаче импульсного тока прямого смещения через затвор-канал, что повысит КПД коммутации ТЭУ.

2. Катод выполнен в виде изотипного гетероперехода n^+-AlGaAs – n-GaAs, который представляет собой униполярно-инжекционный диодный переход, т.е. n-канальная область, в принципе, даже при отсутствии инжекции на p^+-n-переходе затвор-канал, может модулироваться достаточно плотной инжекцией электронов из гетеослоя с уровнем энергии от 1,6 до 1,8 эВ, с диффузионной длиной электронов Ln до 30…60 мкм, что на 0,17…0,37 выше, чем в n-канальной области, и к тому же с большой глубиной модуляции проводимости в канале $\sigma = qn\mu_n$, где q – заряд электрона, n – концентрация инжектированных носителей заряда, μ_n – подвижность электронов.

3. В связи с тем, что соотношение $\mu_{n\ GaAs}/\mu_{n\ Si} \approx 6{,}6$, а в кремниевом канале (без инжекции дырок из затвора) при полевом воздействии катод-анод доминирует термоэмиссионный механизм, который хорошо раскрыт в монографиях по диодам Шоттки, или, иными словами, протекание тока в кремниевом n^+-n-p^+-канале будет представлять собой не что иное, как перенос тока в слаботочном стабисторе с насыщением тока вследствие насыщения подвижности электронов. В отличие от кремниевого n^+-n-типа катода, в нашем случае из катода n^+-AlGaAs/n-GaAs будет наблюдаться мощная инжекция электронов изотипного перехода в n-типа канал. Образуется высокоплотная электронно-дырочная плазма (ЭДП).

Электронно-дырочная плазма в GaAs канале очень подвижна из-за высокой амбиполярной подвижности электронно-дырочных носителей заряда.

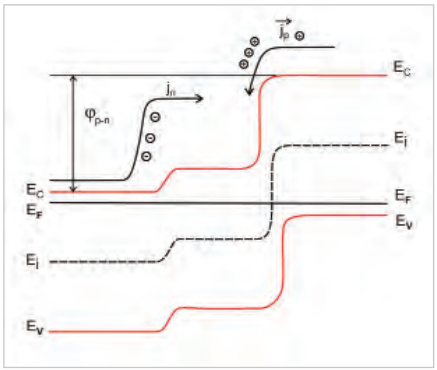


Рис. 6. Зонная энергетическая диаграмма системы n^+-Si – n-Si – p^+-Si катодной области кремниевого ТЭУ

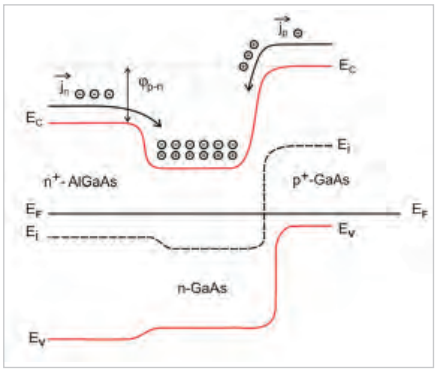


Рис. 7. Зонная энергетическая диаграмма системы n^+-AlGaAs – n-GaAs – p^+-GaAs катодной области GaAs ТЭУ

При подаче запирающего напряжения ($U_з < 0$ В) на p^+-затвор будет происходить процесс релаксации ЭДП-заряда с дифференцированным вытеканием дырок в затворную область, электронов – в анодную область, а также с процессами рекомбинации носителей заряда (зона/зона); зона – рекомбинационные центры в запрещённой энергетической зоне. Например, на атомах кремния, являющегося катализатором LPE (Liquid-Phase Epitaxy) – жидкофазного эпитаксиального процесса.

При запорном (отрицательном) напряжении на затворе после релаксации ЭДП в истоковой области между затворами p^+-типа возникает область пространственного заряда, блокирующая протекание тока в канале между гетероистоком n^+-AlGaAs/n-GaAs и GaAs p^+-анодом.

Конкретный пример исполнения AlGaAs/GaAs ТЭУ состоит в следующем.

На p^+-GaAs монокристаллической подложке после химико-динамической полировки (ХДП) пластины, в частности, на установке Logitech в реакторе кварцевой трубы с заданным градиентом температуры в пределах 750…900°C, из расплава GaAs (источник атомов As) и Ga выращивается эпитаксиальный слой GaAs n-типа проводимости.

Концентрация доноров N_D контролируется уровнем лигатуры атомов Si, Te или Sn. В частности, как правило, N_D регулируется в пределах 1014…1015 см$^{-3}$, с толщинами эпитаксиального слоя от 10 до 50 мкм, что соответствует диапазону электропрочности p-n-перехода (затвор-сток) в пределах максимальных напряжений пробоя $U_{проб.\ СИ} = 200…800$ В.

Затворная p^+-область создаётся методом диффузии атомов Zn (из насыщенного цинком графита) в среде водорода через маску из плёнок Si_3N_4 толщиной от 0,3 мкм (нитрида кремния с усилением в некоторых случаях дополнительным оксидным слоем кремния SiO_2, осаждённого газофазным методом, толщиной от 0,5 мкм).

Расстояние L_n (ширина канала под катодом) между p^+-затворными областями при проектировании полосковой топологии катода и затвора транзистора выбирается из условия:

$$L_n => 2\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0\varphi_T}{qN_D}}, \qquad (6)$$

где φ_T – собственный потенциал p^+-n-перехода, который рассчитывается по формуле:

$$\varphi_T = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A}{N_D}, \qquad (7)$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура по Кельвину; N_D – концентрация донорной примеси в n-типа канале; N_A – концентрация акцепторной примеси в p^+-типа затворе (справочно: при T = 25°C значение $\frac{kT}{q} = 0{,}026$ эВ).

Исходя из вышеприведённых формул, n-типа канал под гетерофазным катодом при $U_{ЗИ} > 0$ В открыт и является проводящей областью; при $U_{ЗИ} << 0$ область канала под гетероистоком становится не проводящей для потока электронов, а изотипной. n^+-AlGaAs/n-GaAs переход будет закрыт для инжекции электронов.

Эпитаксиальный AlGaAs слой толщиной 1...3 мкм выращивается либо LPE, либо MOCVD-методом, легируется атомами теллура или олова с уровнем концентрации примеси выше, чем 10^{18}см$^{-3}$.

Для снижения прямых потерь напряжения на омических контактах на

Таблица 1. Характеристики современных мощных силовых ключей

Тип прибора	Преимущества	Недостатки	Области применения
Традиционный тиристор (SCR)	Самые низкие потери во включённом состоянии. Самая высокая перегрузочная способность. Высокая надёжность. Легко соединяются параллельно и последовательно	Не способен к принудительному запиранию по управляющему электроду. Низкая рабочая частота	Привод постоянного тока, мощные источники питания; плавление и нагрев; статические компенсаторы; ключи переменного тока
GTO	Способность к управляемому запиранию. Сравнительно высокая перегрузочная способность. Возможность последовательного соединения. Рабочие частоты до 250 Гц при напряжении до 4 кВ	Высокие потери во включённом состоянии. Очень большие потери в системе управления. Сложные системы управления и подачи энергии на потенциал. Большие потери на переключение	Электропривод; статические компенсаторы; реактивные мощности; системы бесперебойного питания; индукционный нагрев
IGCT	Способность к управляемому запиранию. Перегрузочная способность та же, что и у GTO. Низкие потери во включённом состоянии на переключение. Рабочая частота – до единиц кГц. Встроенный блок управления (драйвер). Возможность последовательного соединения	Не выявлены из-за отсутствия опыта эксплуатации	Мощные источники питания; электропривод
IGBT	Способность к управляемому запиранию. Самая высокая рабочая частота (до 10 кГц). Простая неэнергоёмкая система управления. Встроенный драйвер	Очень высокие потери во включённом состоянии	Электропривод; системы бесперебойного питания; статические компенсаторы и активные фильтры; ключевые источники питания
DEC-Si (ДЭУ)	Способность к управляемому запиранию. Высокая рабочая частота (до 100 кГц). Простая неэнергоёмкая система управления. Встроенный драйвер	Очень низкие статические и динамические потери	Электропривод; системы бесперебойного питания; статические компенсаторы и активные фильтры; ключевые источники питания
HMOSJFET	Способность к управляемому запиранию. Высокая рабочая частота (до 1 МГц). Простая неэнергоёмкая система управления. Встроенный драйвер	Очень низкие статические и динамические потери	Электропривод; системы бесперебойного питания; статические компенсаторы и активные фильтры; ключевые источники питания

поверхности n^+-AlGaAs может быть нанесён дополнительный LPE или MOCVD эпитаксиальный n^+-GaAs слой в пределах 1…3 мкм с более высокой концентрацией донорной примеси, чем в n^+-GaAs слое, с туннельно-дрейфовым переносом заряда электронов из n^+-GaAs слоя в n^+-AlGaAs слой. Омические контакты выполняются на основе системы AuGe (80 нм) / Ni (100 нм) / Au (> 2000 нм).

Травление меза-области проводится в две стадии (в магнитомешалке):

1) глубокое травление в серно-перекисном растворе в соотношении 1:1;

2) полирующее травление в серно-перекисном растворе с более слабой концентрацией серной кислоты в соотношении 1:3.

На финишной стадии поверхность эпитаксиального слоя n-типа проводимости пассивируется ALD-покрытием, в нашем случае наноплёнкой Al_2O_3 или AlN, TiO_2, Hf_2O_3 толщиной 2…15 нм с последующим нанесением на неё фотоимида, например, производства “Fuji” (Япония), толщиной до 15 мкм с ультрафиолетовой полимеризацией после фотогравировки (фотолитографии).

Контроль параметров кристалла производится на зондовой установке с подогревом кристалла на контактном столике до +250…+300°C.

Данный тиристор, вероятно, следует принимать во внимание в качестве абсолютного конкурента Si-IGBT-, SiC-MOSFET- и Si-MOSFET-транзисторам. Фактически это новое семейство ещё неизвестных на мировом рынке GaAs полевых тиристоров с изолированным затвором, которые можно будет обозначить следующим образом: гетероинжекционный полевой тиристор со статической индукцией, имеющий комбинированное гетеро-MOS/p-n-управление проводимостью канала, или HMOSJFET (где H – гетероинжекционный, MOS – МОП-затвор, J – p-n-затвор, FET – полевой тиристор с управляющим p-n-переходом). В зависимости от параметров (толщины, концентрации свободных носителей) n^+-AlGaAs-, n-GaAs-, in-GaAs-, n^--GaAs-слоёв вольт-амперные характеристики нового тиристора будут или триодного, или пентодного типа, т.е. иметь либо нормально открытый канал, либо нормально закрытый. Входные ёмкости HMOSJFET-структур (эквивалент выходной мощности управляющего драйвера) практически на три порядка (в 1000 раз) меньше, чем входные Cgs у SiC- или Si-MOSFET, чем и объясняется их быстродействие. Триодная структура GaAs полевого тиристора вследствие мощной электронной инжекции гетероизотипного катода (n^+-AlGaAs / n-GaAs / i-GaAs) по плотности тока будет выше, чем Si-IGBT. По сути, триодная структура – электронный прототип Si-IGBT приборов с той лишь разницей, что частота коммутации таких тиристоров будет находиться в мегагерцевом диапазоне, а на пути протекания тока только один переход.

Данную конструкцию ТЭУ можно выполнять и Si, используя объединение технологий Trench и [6]. Себестоимость такого прибора будет гораздо ниже, чем на основе GaAs, но по статическим и динамическим параметрам он будет превосходить приборы типа Si-IGBT и MOSFETы.

В 2020 году фирма Cree наладила производство серийных МОП-транзисторов на карбиде кремния (SiC), которые из-за широкозонности материала показывают рекордные значения по сопротивлению канала в открытом состоянии (R_k) и максимальному рабочему напряжению по сравнению с обычными МОП-транзисторами и могли бы составить конкуренцию ТЭУ. Однако из-за низкой подвижности электронов (900 см^2/(В·с), а в канале и того меньше – 200...300 см^2/(В·с), у Si – 1450 см^2/(В·с)), они могут работать на частоте не выше 150 кГц. Также они проигрывают ТЭУ и по R_k. В ТЭУ плотность электронно-дырочной плазмы на несколько порядков выше, чем в МОП-транзисторах на SiC. Кроме того, они имеют такие недостатки, как высокая себестоимость (SiC по твёрдости не уступает алмазу и имеет высокую дефектность кристаллической решётки), низкая спецстойкость, высокая вероятность включения паразитного диода и сложность в управлении из-за низкой зависимости ширины ОПЗ от приложенного напряжения.

ТЭУ существенно отличается от обычных тиристоров. Обычные тиристоры имеют четырёхслойную структуру, а ТЭУ – двухслойную, как диод, поэтому его правильней называть диодом с электростатическим управлением (ДЭУ). В табл. 1 приведены характеристики мощных силовых высоковольтных современных ключей.

Заключение

Авторами данной статьи разработаны новые конструктивно-технологические приёмы построения высоковольтных тиристоров со статической индукцией (ТЭУ) на Si и GaAs, которые позволят создать приборы с параметрами, превосходящими лучшие зарубежные тиристоры и приборы на SiC во всём диапазоне рабочих напряжений. В связи с тем, что у ТЭУ на пути протекания тока только один p-n-переход, авторы предлагают их называть диодами с электростатическим управлением (ДЭУ).

Литература

1. *Максименко Ю.Н.* Транзистор со статической индукцией КП926 с повышенным быстродействием // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2022. Вып. 3 (266).
2. *Рогачев К.Д.* Современные силовые запираемые тиристоры // Рынок микроэлектроники. 2015.
3. *Ржеусская А.Д., Корнюшко О.А.* Устройство и применение запираемых тиристоров // Актуальные проблемы энергетики. 2016.
4. *Nishizawa I., Nonaka T., Mochida Y.* Static induction transistor logik // Proc. 1979 Int. Conf. Solid State Pevicea (Tokyo) lap, I. Appl. Phys. Suppl. 19.01.1980. P. 279–282.
5. Normally-off type high speed SI-thiristor / Y. Nakamura, H. Tadano, S. Sagiyama at al. // International Electron Devices Meet. Sun-Fransisco, Calif. 1982. P. 480–483.
6. Авторское свидетельство № 1215546 СССР, МКИ HOI 21/18. Способ изготовления полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом и вертикальным каналом: № 3052227 : заявл. 22.06.1982 : зарег. в Госреестре изобретений СССР 01.11.1985 / Ю.Н. Максименко, С.Н. Корнилова, Н.М. Жуковский.
7. *Максименко Ю.Н.* Мощные полупроводниковые приборы со статической индукцией: монография. Новосибирск: PVN, 2022.

Ионизирующее излучение космического пространства и конструирование радиационно-стойких приборов для систем управления космическими аппаратами. Часть 1

к.т.н. Сергей Кравчук, д.т.н. Владимир Соколов, к.т.н. Оксана Вовк, к.т.н. Михаил Марченко, к.т.н. Дмитрий Шеломанов (МОКБ «Марс» – филиал ФГУП «ВНИИА»)

Космическое пространство (КП) является естественной радиационной средой, в которой действуют: галактическое излучение, излучение Солнца, особенно в периоды солнечной активности. Магнитное поле Земли, захватывая заряженные частицы, образует естественные радиационные пояса Земли и исскуственные радиационные пояса Земли, оказывающие значительное влияние на аппаратуру и человека. При полётах к некоторым планетам космические аппараты (КА) могут подвергаться воздействию ионизирующих излучений этих планет.

Общеизвестно, что основные необратимые дефекты в приборах создают нейтроны из-за своей высокой проникающей способности, результатом чего является смещение атомов из узлов кристаллической решетки и образование устойчивых радиационных дефектов. Протонное излучение также приводит к образованию необратимых дефектов кристаллической структуры. Заряженные частицы, протоны и электроны, помимо этого, создают эффекты ионизации, которые, как правило, являются обратимыми, если только ионизационные токи не вызывают пробой [1].

При определении уровня воздействия ионизирующих излучений КП необходимо принимать во внимание влияние на аппаратуру экранов, корпусов, которые, в свою очередь, не только ослабляют воздействие излучений, но и могут являться источниками вторичного излучения в виде нейтронов, гамма-квантов, протонов и других тяжёлых частиц [1].

Для обеспечения длительного функционирования в условиях КП аппаратура проектируется таким образом, чтобы минимизировать нарушения работоспособности из-за действия ИИ КП.

Природа происхождения и характеристики ионизирующих излучений космического пространства (ИИ) в настоящее время достаточно хорошо изучены, а различные тонкости этой проблем рассмотрены, в частности, в [2, 3]. Приведём общие сведения об ионизирующем излучении КП, которое оказывает существенное влияние на вопросы проектирования аппаратуры КА.

Галактические космические лучи (ГКЛ) образуются вне Солнечной системы, воздействуя на КА в межзвёздном и околоземном пространстве за счёт притяжения магнитного поля Земли. ГКЛ состоят из протонов (приблизительно 85%), ядер гелия (10%), более тяжёлых ядер (1%), электронов (1%), а также рентгеновского и гамма-излучений [4, 5]. Частицы ГКЛ обладают очень высокой энергией – от 10^8 до 10^{20} эВ. Плотность потока частиц подвержена относительно небольшим колебаниям, обусловленным вариациями межпланетного магнитного поля, и составляет около 5 част/(см^2·с).

Из-за низкой плотности потока ГКЛ доза, которую может получить аппаратура за год от воздействия лучей ГКЛ, составляет 1…50 рад [1]. Однако вспышки многих звёзд создают мощное ионизационное воздействие.

Солнечные космические лучи (СКЛ) связаны с хромосферными процессами на Солнце, которые имеют нерегулярный характер, проявляясь в период повышенной солнечной активности (до 10 вспышек, длящихся несколько суток в год). Плотность потока частиц может составлять 10^6 част/(см^2·с) при энергии до 10^7 эВ. Их воздействие может вызывать деградацию отдельных приборов, в том числе солнечных элементов. Интенсивность солнечного излучения изменяется от вспышки к вспышке, годовые дозы радиации могут составлять 10^3…10^4 рад на поверхности космического аппарата [5]. Вероятность появления солнечных протонов на траектории Земли вне магнитосферы в период максимумов

Таблица 1. Усреднённые параметры потоков частиц космических лучей и радиационных поясов Земли

Вид излучения	Состав излучения	Энергия частиц, эВ	Плотность потока, част/(см^2·с)	Средняя доза облучения КА на его поверхности за год, рад
Галактические космические лучи (ГКЛ)	Протоны (90 %)	10^8…10^{20}	1…2	10
	Ядра гелия (7…15%)			
	Ядра тяжёлых элементов (1 %)			
Солнечные космические лучи (СКЛ)	Протоны (90 %)	1…10^7	10^3…10^4 max 10^6	103…104
	Ядра других частиц (10 %)			
Радиационные пояса Земли (РПЗ) Внешний				За 5 лет
	Протоны Электроны	(1…10)·10^6	10^6…10^7	5·10^4…5·10^5
Внутренний	Протоны Электроны	(20…800)·10^6 < 1·10^6	10^4 10^6..10^7	5·10^4…5 ·10^5

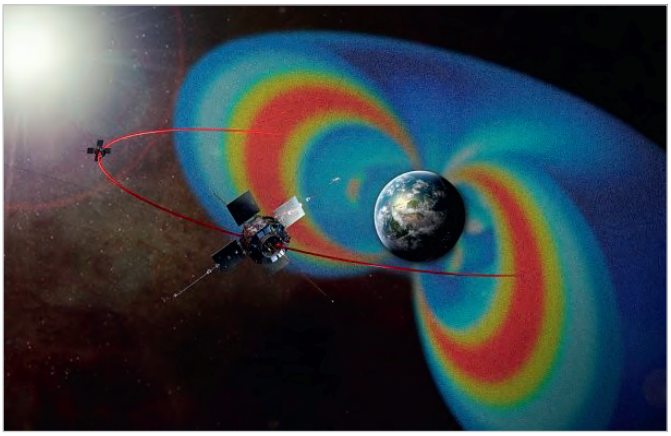


Рис. 1. Внутренний и внешний естественные радиационные пояса Земли

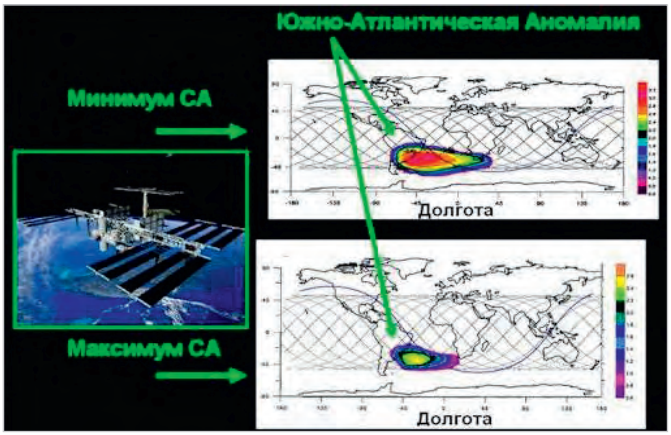


Рис. 2. Распределение радиационных полей в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии

солнечной активности оценивается [5] на уровне 0,01÷1 протонов с энергией более 30 МэВ с флюенсом 10^{10} см$^{-2}$.

Интенсивность потоков ГКЛ изменяется в противофазе к 11-летним вариациям солнечного цикла, с уменьшением активности Солнца происходит увеличение потока частиц ГКЛ. При повышении уровня активности Солнца усиливается существующее в межпланетном пространстве магнитное поле, что затрудняет проникновение частиц ГКЛ в Солнечную систему [6]. Аналогичная зависимость наблюдается при солнечных вспышках.

Параметры потоков космических лучей приведены в табл. 1.

Проникновение частиц ГКЛ и СКЛ внутрь магнитосферы Земли ограничивается экранирующим действием её геомагнитного поля.

Это же явление создаёт наибольшую радиационную опасность для космических аппаратов.

Магнитное поле Земли захватывает заряженные частицы, в результате чего земная магнитосфера оказывается заполненной электронами, протонами, а также ионами разных энергий, совокупность которых и составляет радиационные пояса. Радиационные пояса Земли образуются ионосферой Земли, созданной в результате ионизации нейтральных атомов и молекул верхней атмосферы коротковолновым солнечным излучением (рентгеновским и др.), и захваченными магнитным полем Земли заряженными частицами с энергией от сотых долей до десятков миллионов электрон-вольт. Схема строения магнитосферы Земли в общих чертах приведена на рис 1.

Внутренний радиационный пояс Земли состоит в основном из протонов с энергией 20…800 МэВ, внешний – из электронов с энергией до 1 МэВ, в периоды повышенной солнечной активности их энергия увеличивается до 10 МэВ, плотность потоков частиц может составлять до 10^6…10^7 част/(см^2·с).

Доза ионизирующего излучения, которую может накопить бортовая аппаратура при нахождении в радиационном поясе в течение 5 лет, составляет 5×10^4…2×10^5 рад [6]. Это достаточно высокая доза.

Радиационные пояса Земли имеют сложное асимметричное строение, определяемое структурой магнитного поля Земли [5].

Исследования радиационных условий в околоземном космическом пространстве ведутся российскими учёными начиная с запуска второго искусственного спутника Земли в ноябре 1957 года. В Советском Союзе этими исследованиями руководил академик С.Н. Вернов. Американские специалисты под руководством Дж. Ван Аллена в результате полетов американских ИСЗ Explorer-1 и Explorer-2 в феврале-марте 1958 года получили более полную информацию о радиационных условиях в космическом пространстве и интерпретировали эти результаты достаточно близко к реальным условиям. Наиболее подробно радиационные пояса Земли исследовались с помощью 3-го советского ИСЗ, запущенного в мае. И хотя открытие и исследование радиационных поясов Земли принадлежит советским учёным не в меньшей степени, чем американским, часто радиационные пояса Земли называют поясами Ван Аллена [7].

Следует обратить внимание, что аналогичные радиационные пояса расположены вокруг всех планет, имеющих магнитное поле.

Среднее удаление от земной поверхности радиационных поясов Земли составляет 1000–1500 км. Но вблизи восточного побережья Южной Америки существует область, в которой геомагнитное поле ослаблено. Поэтому внутренняя граница РПЗ Земли опускается до высоты 300 км. Эта область называется Южно-Атлантической магнитной аномалией.

На рис. 2 приведено пространственное распределение радиации в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии согласно [8].

И хотя Международная космическая станция (МКС) защищена магнитным полем Земли от сильнейших радиационных воздействий КП, на рис. 2 приводится набор витков орбиты Международной космической станции над радиационно-опасной областью Южной Атлантической Магнитной Аномалии, которые в течение короткого промежутка времени МКС пересекают. Согласно американским исследованиям [8], на МКС каждый астронавт получает в сутки дозу радиации примерно вдвое больше облучения пациента в поликлинике при рентгене грудной клетки, а средняя доза, получаемая космонавтом на МКС за полугодовую экспедицию, примерно равна средней дозе ликвидатора Чернобыльской аварии. И это примерно одна шестая от допустимой предельной дозы за всю карьеру космонавта.

Эта величина создаётся преимущественно за счёт пребывания станции в районе Южной Атлантики. Кроме того, дипольное магнитное поле Земли искажается во время магнитных бурь, в результате чего уменьшается минимальный энергетический порог отсека-

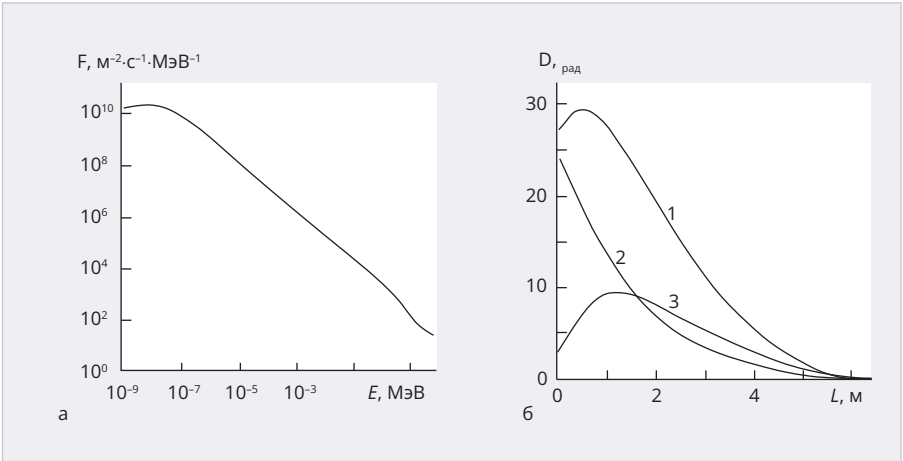


Рис. 3. а) энергетический спектр нейтронов, образующихся при бомбардировке лунного грунта частицами ГКИ и СКИ; б) зависимость дозы от толщины лунного грунта: 1 – суммарная доза; 2 – доза от частиц ГКИ и СКИ; 3 – от вторичных нейтронов

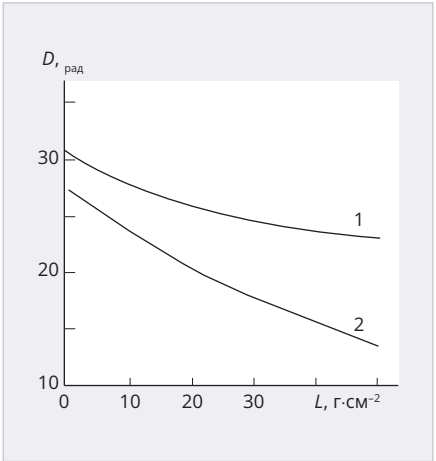


Рис. 4. Зависимость дозы от толщины стенок КА на поверхности Марса: 1 – годовая доза от ГКЛ; 2 – доза от солнечной вспышки

емых ионизирующих излучений Солнца, позволяя им проникать на низкие широты. Географическое положение космического аппарата относительно опасных радиационных мест определяет конкретный уровень воздействующих на него ионизирующих излучений.

Таким образом, радиационная обстановка в космическом пространстве постоянно меняется во времени и в пространстве. Поэтому ведутся непрерывные работы по прогнозированию радиационных условий в различных точках космического пространства. На их основе разрабатывается документация с указанием характеристик радиационных полей в любой точке космического пространства в различные временны́е промежутки. Это позволяет выбирать оптимальное время старта космических аппаратов, предназначенных для работы на различных орбитах, проведения работ на них, формирования технического задания по стойкости к воздействию ФКП аппаратуры КА.

В случае высотного ядерного взрыва возможно возникновение искусственного радиационного пояса Земли (ИПЗ) в результате взаимодействия продуктов распада с магнитным полем Земли. В ИПЗ входят преимущественно электроны с плотностью потоков 10^9 част/(см^2·с). Время существования такого пояса может составлять до нескольких месяцев [6].

Кроме того, очевидно, что наличие таких частиц, как протоны, в первую очередь, а также ядер тяжёлых элементов и т.д. приводит к распаду имеющихся в космическом пространстве элементов вещества с образованием нейтронов и гамма-квантов [6].

Поэтому необходимо принимать во внимание наличие нейтронного излучения в космическом пространстве.

В результате взаимодействия ГКЛ и СКЛ с атомами верхней атмосферы образуется вторичная радиация. Поэтому поток вторичных частиц, в составе которого присутствуют нейтроны, необходимо учитывать при оценке радиационных условий на околоземных орбитах (ниже 1000 км) [9].

При полётах к другим планетам необходимо учитывать не только распределение ГКИ и СКИ в межпланетном пространстве, но и особенности радиационных условий в их околопланетном пространстве.

Например [8], когда КА отправится к Луне, он будет в течение нескольких часов пересекать внешние радиационные пояса Ван-Аллена, где имеются зоны повышенного излучения. А дальше, за пределами земной магнитосферы, уровень радиации возрастёт за счёт галактического космического излучения. Луна, в отличие от Земли, не обладает атмосферой и магнитным полем. Поэтому ГКИ и СКИ непосредственно взаимодействуют с лунным грунтом, в результате чего образуется нейтроны.

На рис. 3 приведены энергетический спектр нейтронов при бомбардировке лунного грунта частицами ГКИ и СКИ и доза поглощённого излучения от толщины лунного грунта согласно [10].

Таким образом, полет КА к Луне и проведение работ на ней связано с воздействием значительной дозы облучения.

При оценке радиационных условий на Марсе также принимаются во внимание нейтроны, возникающие в марсианском грунте.

На рис. 4 приведена зависимость дозы внутри КА на поверхности Марса от толщины стенок КА (Al) с учётом дополнительной защиты, создаваемой марсианской атмосферой (16 г·см$^{-2}$ CO_2), согласно [10].

Юпитер обладает более мощными и масштабными радиационными поясами по сравнению с Землей.

На рис. 5 приведены значения поглощённой дозы и мощности дозы за защитным экраном частицами радиационных поясов Юпитера согласно [10].

Поглощённая доза на рис. 5 (а) приведена за защитным экраном толщиной 8 мм, считаемым алюминиевым. Указанная доза создаётся частицами радиационных поясов Юпитера на разном расстоянии от него, выраженном в радиусах планеты (RЮ = 71,5 тыс. км).

На рис. 5 (а) также приведено положение орбит спутников Юпитера – Ио, Европы и Ганимеда.

На рис. 5 (б) приведена зависимость мощности излучений от толщины защитной оболочки КА на орбитах Европы, Ганимеда и Каллисто.

Как следует из рис. 5 (а), поглощённая доза, создаваемая радиационными поясами Юпитера, весьма существенна при незначительной мощности воздействующего излучения (рис. 5 (б)).

Сравнение радиационных условий в окололунном пространстве (рис. 3 (б)), на поверхности Марса (рис. 4) и в пространстве Юпитера (рис. 5 (а)) показывает, что в пространстве Юпитера радиационные условия на несколько порядков более жёсткие, чем в пространстве других планет.

Видимо, это обусловлено более существенным влиянием ГКИ из-за наи-

большего удаления Юпитера от Солнца из этих трёх планет.

Обратимся к вопросу вторичных излучений, вызванных взаимодействием космического излучения с материалами конструкций. Это наиболее актуально для крупногабаритных межпланетных КА и иных космических объектов, к которым относится и МКС.

Для обеспечения защиты от проникающей радиации экран должен одновременно замедлять быстрые нейтроны (протоны) до уровня тепловых, поглощать нейтроны (протоны) и предотвращать дальнейшее распространение гамма-квантов. Это предполагает содержание в материале водородосодержащих материалов, обладающих высокой способностью к замедлению нейтронов (протонов), и тяжёлых материалов, эффективно защищающих от действия гамма-излучения [6].

С другой стороны, описывая взаимодействие заряженных частиц с аппаратурой космических аппаратов, необходимо учесть возможность усиления дозовых нагрузок на ЭРИ в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов за счёт тормозного излучения, создаваемого частицами космического пространства в корпусах аппаратуры и космических аппаратов. В [11] установлено, что за счёт этого эффекта может происходить увеличение поглощённой дозы ИИ космического пространства в 2–5 раз в чувствительном объёме ЭРИ МОП-технологий. Расчёты производились для ЭРИ, применяемых в составе бортовой аппаратуры КА, функционирующих на высокой круговой (H = 20 000 км) и геостационарной орбитах.

В [12] методом Монте-Карло также определён вклад в поглощённую дозу радиации тормозного излучения на геостационарной орбите внутри космического аппарата. При моделировании учитывались фотоэффект, Комптон-эффект, рождение электрон-позитронных пар в поле ядра атома.

Эти процессы достаточно подробно изучены и описаны [6].

Вернёмся к наиболее актуальным полётам на орбитах Земли.

Как упоминалось ранее, уровень воздействующих излучений и преобладающий тип частиц при полетах на орбитах Земли зависит от типа орбит, на которых функционируют КА. Рассмотрим более подробно этот вопрос.

Искусственные спутники Земли, исходя из решаемых задач, функционируют на определённых околоземных орбитах, характеризующихся различными радиационными условиями.

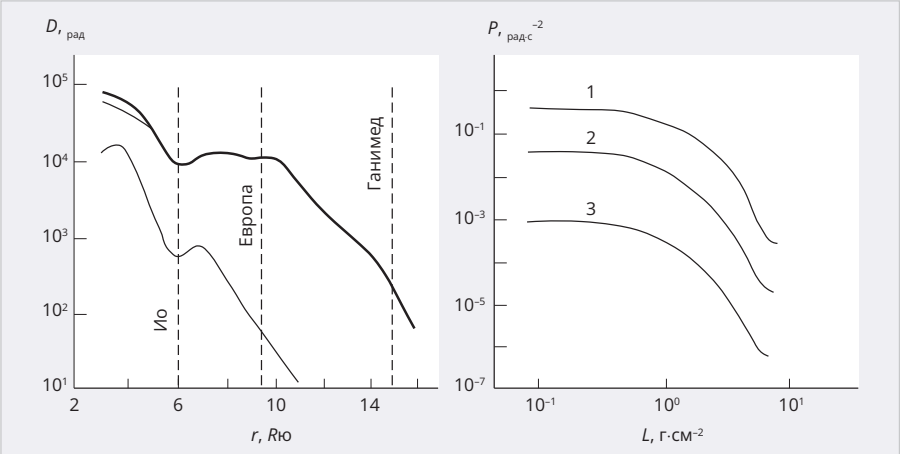


Рис. 5. а) величина поглощённой дозы за защитным экраном толщиной 8 мм (Al) в магнитосфере Юпитера на различном расстоянии от него: 1 – суммарная доза; 2 – от электронов; 3 – от протонов; б) зависимость мощности поглощённой дозы от толщины защитного экрана (Al) для орбит спутников Юпитера: 1 – Европа; 2 – Ганимед; 3 – Каллисто

Таблица 2.1. Параметры орбит

Орбита	Высота, км	Наклон, градусы
Орбита МКС	350...400	51,6
Солнечно-синхронная орбита (ССО)	800...1000	90...100
Геостационарная орбита (ГСО)	35 790	0
Орбита спутников системы ГЛОНАСС	19 100	64,8
Высокоэллиптическая орбита спутника типа «Молния» (ВЭО)	500/39 660	65
Низкие полярные орбиты	200...2000	Более 70

В табл. 2.1 приведены примеры орбит с различными параметрами.

Высота орбиты международной космической станции постоянно меняется в диапазоне от 340 до 417 км над уровнем моря. Данный диапазон высот выбран по целому ряду причин как оптимальный. Например, переход с 360-километровой орбиты на 410-километровую позволил заметно снизить расход топлива на поддержание орбиты, но увеличил дозу облучения экипажа примерно на 20%.

Бóльшая часть сбоев в работе электронной аппаратуры происходит в районе магнитной аномалии в районе Южной Атлантики. Именно здесь радиационные пояса «провисают» над Землей. Увеличение интенсивностей потоков протонов РПЗ и вызываемых ими сбоев наблюдается также в приполярных областях. Эта ситуация отражена в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Число одиночных сбоев за сутки интегральных микросхем динамической памяти на разных орбитах

Излучение	Низкая h = 648 км, i = 18°	Полярная h = 1400 км, i = 85°	ГСО
ГКЛ+СКЛ	$5{,}6\times10^{-6}$	0,014	0,39
РПЗ	0,83	8,3	0

В [13] описаны радиационные условия на геостационарной орбите (ГСО), которая широко используется для спутников связи.

Геостационарная орбита (ГСО) широко используется потому, что выведенный на неё КА имеет одинаковую угловую скорость с расположенной под ним точкой земной поверхности, и, следовательно, он постоянно находится над этой точкой (отсюда название орбиты), создавая тем самым очень удобные условия для ретрансляции через него радиосигналов. Поэтому геостационарные КА работают преимущественно в космических системах радиосвязи и телевидения, хотя некоторые из них используются для решения геофизических и метеорологических задач.

ГСО расположена в плоскости географического экватора на расстоянии 36 тыс. км от поверхности Земли в области внешнего ЕРПЗ.

На ГСО наблюдаются потоки электронов ЕППЗ с энергией 6 МэВ и протонов ЕРПЗ с энергией до 2 МэВ. Алюминиевая пластинка с толщиной 0,01 г/см^2 практически полностью поглощает все протоны на ГСО.

В [13] утверждается, что для аппаратуры, установленной на космических аппаратах на ГСО и защищённых экраном менее 1 г/см^2 алюминия, основную радиационную угрозу представляют потоки электронов ЕРПЗ. Для аппаратуры на ГСО, защищённой экраном более 2 г/см^2 алюминия, основную угрозу представляют потоки частиц СКИ и тормозного излучения электронов.

Орбита глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС выбрана для обеспечения высокой точности измерения координат объектов на земной поверхности и в околоземном пространстве. Для круговой орбиты спутников ГЛОНАСС, лежащей вблизи центра внешнего РПЗ, весьма критичным для КА воздействующим фактором являются частицы РПЗ.

Высокоэллиптическая орбита (ВЭО) – эллиптическая орбита, у которой высота в апогее во много раз превышает высоту в перигее. Орбита называется «Молния» в честь спутников, которые использовали этот тип орбиты в 1960-х годах. На базе спутников «Молния» с высокоэллиптической орбитой создана в конце 1960-х гг. первая в нашей стране космическая система связи. Её недостатком по сравнению с системами, базирующимися на геостационарных КА, является необходимость непрерывного изменения ориентации наземных антенн в соответствии с перемещением спутника по высокоэллиптической орбите.

Солнечно-синхронная орбита (гелиосинхронная) за счёт фиксированной ориентации КА относительно Солнца обеспечивает прохождение спутника над любой заданной точкой поверхности Земли в одно и то же местное среднее солнечное время. Обычно используется для спутников наблюдения Земли для дистанционного зондирования Земли, в настоящее время предполагается использовать для создания низкоорбитальных систем связи [14].

Полярная орбита – орбита, по которой спутник проходит над обоими полюсами Земли, она имеет наклон к плоскости экватора 90º.

Рассмотрим некоторые конкретные примеры.

Спутник «Арктика-М» № 1 [15], позволяющий обозревать северные территории планеты, функционирует на высокоэллиптической орбите типа «Молния» с высотой в апогее около 40 000 км, а в перигее 500 км. Этот перепад высот позволяет оценить радиационную обстановку в широком диапазоне областей космического пространства. Оценивается радиационная обстановка, создаваемая рядом космических лучей. На КА «Арктика-М» установлен гелиогеофизический аппаратный комплекс, предназначенный в том числе:

- для контроля и прогноза вспышек активности Солнца;
- контроля и прогноза радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве;
- контроля и диагностики состояния естественных и модифицированных магнитосферы, ионосферы и верхней атмосферы.

Для решения этих задач применяется в том числе спектрометр галактических космических лучей ГАЛС-ВЭ, производящий измерение плотности потока протонов галактического космического излучения с энергией более 600 МэВ, измерение суммарной плотности потока электронов с энергией более 0,15, 0,7, 1,7 и 3,2 МэВ и плотности потока протонов с энергией более 5,0, 15,0, 25,0 и 40,0 МэВ, соответственно [15].

Кроме того, на КА «Арктика-М» установлен и производит измерения объединённый спектрометр корпускулярных излучений СКИФ-ВЭ, обеспечивающий измерение дифференциальных энергетических спектров низкоэнергичных электронов и протонов (0,05…20,0 кэВ), спектров электронов с отстройкой от фона протонов (0,1…10,0 МэВ), спектров протонов с отстройкой от фона электронов (1,0…100,0 МэВ) и α-частиц с энергиями 9,0…50,0 МэВ, электронов с энергиями более 40 кэВ, протонов с энергиями более 0,5 МэВ.

Перечень указанных излучений, получаемых космической системой «Арктика-М», позволяет составить представление о радиационной обстановке на самой высокоэллиптической орбите типа «Молния», то есть практически во всех областях космического пространства прохождения и функционирования искусственных спутников Земли и прохождения КА, предназначенных для работы в дальнем космосе.

Спутник «Арктика-М» № 1 – первая ласточка высокоэллиптической гидрометеорологической группировки космических аппаратов, которую планирует создать «Роскосмос».

Планируется, что ряд спутников «Арктика-М», попеременно сменяя друг друга на рабочих участках орбит, расположенных в районе апогея, обеспечивают непрерывный обзор северной территории Российской Федерации и арктического региона Земли [15].

Космические аппараты серии «Электро-Л» запущены на геостационарную орбиту (2011, 2015 и 2019 годы и 5 февраля 2023 года) [15]. В таком составе спутниковая группировка позволяет наилучшим образом наблюдать всю протяжённую территорию России с востока на запад, а также выполняет функции составного элемента глобальной метеорологической спутниковой системы наблюдения Земли.

Кроме того, спутники ретранслируют сигналы аварийных радиобуев международной спутниковой поисково-спасательной системы – КОСПАС-САРСАТ. Это помогает спасательным службам эффективнее реагировать на сигналы бедствия.

Совместное использование информации от спутников «Арктика-М» с высокоэллиптических орбит и геостационарных спутников «Электро-Л» позволяет решить задачу квазинепрерывного получения оперативных гидрометеоданных [15].

Для научных КА, предназначенных для наблюдения за другими галактиками, выбираются эллиптические орбиты со значительно большей высотой апогея. Так, апогей орбиты астрофизической обсерватории «Спектр-Р» с 10-метровой параболической антенной (уже завершившей свою программу исследований и выведенный из эксплуатации), разработанной российскими специалистами в рамках международного проекта «Радио-Астрон», лежал на высоте около 330 000 км, а перигей – на высоте 600 км. Особую категорию составляют траектории полета межпланетных КА, параметры которых определяются задачами выполняемых исследований [16].

При дальнейшей реализации программы исследования космического про-

странства с помощью аппаратов семейства «Спектр» 13.07.2019 была запущена обсерватория «Спектр-РГ» на гало-орбиту вокруг внешней точки Лагранжа L2 системы «Солнце-Земля» на расстояние 1,5 миллиона километров от Земли, максимальное удаление от плоскости эклиптики 400 тыс. км. Точка L2 удобна для проведения обзоров: вращаясь вокруг оси, которая примерно соответствует направлению на Солнце, «Спектр-РГ» проводит полный обзор небесной сферы за полгода, при этом Солнце не будет попадать в поле зрения. За 4 года учёные смогут получить данные 8 обзоров всего неба. Но при этом необходимо поддерживать аппарат на орбите, проводя корректирующие манёвры [17].

Обсерватория «СпектРГ» состоит из двух телескопов: немецкого eROSITA, работающего в мягком рентгеновском диапазоне (фотоны с энергией 0,3…11 кэВ), и российского ART-XC имени М.Н. Павлинского, который ведёт наблюдения в жёстком рентгене (5…30 кэВ). Работая в течение двух лет в режиме обзора всего неба, телескопы фактически взаимно дополняли друг друга, перекрывая широкий диапазон рентгеновского излучения.

ART-XC может видеть так называемые поглощённые объекты: излучение от них, кроме наиболее энергичного, не доходит до нас, так как его поглощают газопылевые облака, которые образуются вокруг сверхмассивных чёрных дыр в далёких галактиках или в двойных системах с массивными звездами. Жёсткие рентгеновские фотоны способны пройти через это препятствие. Телескоп eROSITA видит мягкое рентгеновское излучение миллионов источников, но если он не заметит всего 5–10% таких поглощённых объектов, то без информации о них теоретики не смогут построить правильные космологические модели.

После 26 февраля 2022 г., когда телескоп eROSITA был переведён немцами в так называемый безопасный режим, российским учёным пришлось оперативно разрабатывать новую программу наблюдений обсерватории «Спектр-РГ», которая позволила с максимальной эффективностью использовать возможности телескопа ART-XC [18].Обобщая существующую информацию, имеет смысл отметить следующее.

«Марс» разработал и изго¬товил бортовые комплексы управления (БКУ) для всех аппаратов «Электро-Л», «Арктика-М», «Спектр-Р» и «Спектр-РГ» [15].

Согласно данным [19] и ГОСТ Р 56526-2015 [20], КА по массе и назначению делятся на подгруппы согласно табл. 2.3 и табл. 2.4.

Таблица 2.3. Разделение КА по массе

№	Масса КА	Назначение	Орбита
1	Менее 100 кг	ДЗЗ, наука	НО
2	100…300	ДЗЗ, наука	ССО, ВЭО
3	300…700	ДЗЗ, метео	ССО
4	700…1200	ДЗЗ, наука, связь	НО, ВЭО, ГСО
5	1200…2500	ДЗЗ, метео, связь	НО, ВЭО, ГСО
6	2500…3500	ДЗЗ, метео, связь	ССО, ВЭО, ГСО
7	3500…7200	ДЗЗ, наука	ССО, отлётные
8	Более 7200	ДЗЗ	НО

Таблица 2.4. Срок активного существования различных типов КА

Тип КА		Масса, кг	САС, лет
Крупногабаритные		Более 1000	10–25
Среднегабаритные		500…1000	7–10
Малые	мини	100…500	5–7
	микро	10…100	3–5
	нано	1…10	1–3
	пико	Менее 1	0,5–1,0

Таблица 2.5. Уровень радиационной нагрузки на аппаратуру на различных орбитах

Орбита, тыс. км	До 0,4	0,4…0,7	0,7…1,0	1,0…3,0	3,0…20	Геостационарная орбита	Высоко-эллиптическая орбита
Доза, крад для толщины 1 г/см^2	4	15	40	700	1000	87	500
Доза, крад для толщины 3 г/см^2	1	5	15	215	6	5	3

Таблица 2.6. Результаты расчёта необходимой дополнительной защиты приборов, обеспечивающей стойкость к воздействию ионизирующих излучений на различных орбитах

Орбита, тыс. км	До 0,4	0,4…0,7	0,7…1,0	1,0…3,0	3,0…20	Геостационарная орбита	Высокоэллиптическая орбита
Стойкость ЭРЭ	Дополнительная защита, г/см^2						
10 крад	0	0	1,15	5,83	0,37	0,37	0,37
100 крад	0	0	0	1,93	0	0	0

В табл. 2.4 приведён срок активного существования (САС) различных типов космических аппаратов согласно ГОСТ Р 56526-2015.

Таким образом, космические аппараты должны функционировать достаточно продолжительный срок на какой-либо из орбит и выполнять свои функции в условиях воздействия ионизирующих излучений.

Поэтому при выборе электронной компонентной базы (ЭКБ) существенной проблемой является обеспечение требований по внешним воздействующим факторам в части (ВВФ) в части радиационной стойкости аппаратуры.

В табл. 2.5 приведены радиационные условия на различных орбитах [5] при прохождении через алюминиевые экраны.

Как следует из табл. 2.5, на электронную компонентную базу воздействуют достаточно высокие уровни ионизирующих излучений, даже при применении защитных экранов.

Таблица 2.7. Дополнительная защита, обеспечивающая стойкость приборов к воздействию ионизирующих излучений на различных орбитах

Стойкость ЭРЭ, крад	Дополнительная защита, кг
10	1,1
100	0,35

Расчёт блоков на радиационную стойкость производится, как правило, после их монтажа на КА с учётом защиты другими блоками и элементами КА.

Если принять, что прибор после установки на КА имеет защиту 2,75 г/см^2, в качестве модели расчёта выбрать сферу, а коэффициент запаса принять равным 1, то получатся результаты расчёта, представленные в табл. 2.6 [1]. Из расчёта следует, что секция прибора длиной 20 мм, высотой 200 мм и шириной 260 мм (~1 модуль) на орбите 1,0…3,0 тыс. км потребует дополнительной защиты, приведённой в табл. 2.7.

Таким образом, оценочные расчёты показали, что для орбиты высотой 1000…3000 км для обеспечения стойкости приборов к воздействию ИИ уровня 10 крад дополнительная защита практически удвоит массу прибора, для обеспечения стойкости приборов к воздействию ИИ уровня 100 крад – увеличивает на 30%.

При этом тормозное излучение от дополнительной защиты не учитывалось.

Так как увеличение массы КА существенно ухудшает их функциональные возможности, становится очевидной актуальность задачи повышения радиационной стойкости ЭКБ.

Пути решения этой задачи рассмотрены во второй части.

Литература

1. *Мырова Л.О., Чепиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 297 с.
2. *Крейнин Л.Б., Григорьева Г.М.* Солнечные батареи в условиях воздействия космической радиации // Тезисы доклада симпозиума «Радиационные дефекты в полупроводниках». М., 2012.
3. *Kase P.G.* The radiation environments of outerplanet mission // IEEE Trans. 2022. Vol. NS-19, № 6. P. 141–146.
4. Радиационные пояса Земли и космические лучи / С.Н. Вернов, В.П. Вакулов, А.В. Горчаков [и др.]. М.: Просвещение, 1970. 128 с.
5. Модель космического пространства / под ред. академика С.Н. Вернова. М.: МГУ, 1983.
6. Радиационная стойкость в оптоэлектронике / Ф.А. Заитов [и др.]. М.: Воениздат, 1987, 166 с.
7. *Логачев Ю.И.* Радиационные пояса Земли: открытия и первые исследования // Природа. 2017. № 12.
8. Ядерная физика в Интернете. Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ и отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ // Учебные материалы курса «Физика атомного ядра и частиц». URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru.
9. *Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.П.* Радиационные эффекты в космосе. М.: ОАО «Корпорация ВНИИЭМ», 2014. 106 с.
10. *Новиков Л.С.* Космическое материаловедение: учебное пособие. М.: Макс Пресс, 2014. 447 с.
11. *Булгаков Н.Н., Бахтызин И.В., Зинченко В.Ф.* Учёт эффекта «усиления дозы вторичного тормозного излучения при прогнозировании дозовых нагрузок на ЭРИ в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2020, вып. 1. С. 31–38.
12. *Безродных И.П.* [*и др.*] Тормозное излучение электронов в веществе космического аппарата. Методика расчёта // Вопросы электромеханики. 2011. Т. 120. С. 37–44.
13. *Безродных И.П.* [*и др.*] Радиационные условия на геостационарной орбите // Вопросы электромеханики. 2010. Т. 117. С. 33–42.
14. *Акимов А.А., Гриценко А.А., Юрьев Р.Н.* Солнечно-синхронные орбиты – основные возможности и перспективы // Инфосфера. 2015. № 68.
15. *Ганжур О.* Три стороны Земли. Прогнозы погоды станут точнее // Страна Росатом. Газета атомной отрасли. 2023. № 5(565). С. 4.
16. *Калашников А.* Телескоп из книги рекордов Гиннеса // Воздушно-космическая сфера. 2017. № 3 (92).
17. *Понятов А.* «Спектр-РГ». Обсерватория длянового обзора неба // Наука и жизнь. 2019. № 8..
18. Первые результаты работы «Спектра-РГ» без немецких партнёров // URL: https://new.ras.ru/mir-nauky/articles/pervye-rezultaty-raboty-spektra-rg-bez-nemetskikh-partnerov, 04 апреля 2022.
19. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учебное пособие / под ред. А.С. Сырова. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
20. ГОСТ Р-56526-2015 Требования надёжности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования. М.: Стандартинформ, 2016.

НОВОСТИ МИРА

Учёные создали беспроводные электронные татуировки для выявления заболеваний сердца

Команда учёных из Техасского университета в Остине разработала ультратонкие неинвазивные электронные тату, которые одновременно измеряют электрическую и механическую активность сердца и способны передавать данные беспроводным способом. Такая технология послужит отличным дополнением даже самым современным фитнес-браслетам и смарт-часам. Технология обеспечит выявление заболеваний сердца и постоянный мониторинг его состояния.

Так называемые e-tatoo представляют собой новое поколение носимых медицинских устройств, приклеиваемых на кожу точно так же, как переводные татуировки. Интегрированные сенсоры считывают и передают на смартфон или другие устройства данные о сердечном ритме и пульсе, сведения о кровяном давлении и уровне стресса. Питается татуировка от внешнего аккумулятора.

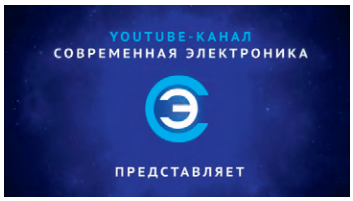
Учёные усовершенствовали разработку, представленную ещё в 2019 году, сделав татуировку беспроводной. Как и прежняя модель, новая версия постоянно контролирует электрическую активность сердца (снимая ЭКГ), а также регистрирует и оценивает звуки в ходе работы сердца, что позволяет регистрировать механические характеристики сердца. В случае, если сердце работает не так, как следовало бы, звуковая матрица будет совсем другой. Это чрезвычайно важно для диагностики без посещения врача.

Электронная татуировка на прозрачной основе выполнена из серии небольших микросхем и сенсоров, связанных эластичными контактами – её можно приклеить к груди пациента, как пластырь. Толщина такой наклейки составит примерно 200 мкм – как два человеческих волоса. Вес составляет 2,5 грамма, а заряда аккумулятора хватит на 40 часов непрерывной работы. Информация передаётся в режиме реального времени на Bluetooth-совместимые устройства.

По словам исследователей, устройство не требует посещения врача и подключения к громоздким элементам питания или аппаратуре. Кроме того, постоянное ношение задолго до появления проблем позволит выявить их и устранить на самой ранней стадии. Как заявляют учёные, некоторые заболевания могут не проявлять себя до тех пор, пока проблема не становится чересчур запущенной. Ранняя диагностика позволяет предотвратить до 80% соответствующих болезней.

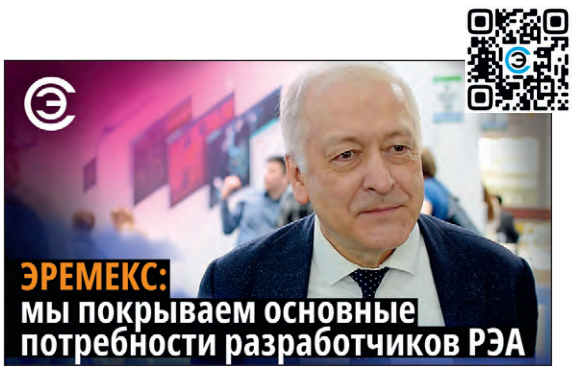
Устройства тестировались на пяти здоровых пациентах, живших в обычном режиме, уровень погрешности измерений оказался очень низким. Результаты опубликованы в журнале Advanced Electronic Materials.

3dnews.ru



YouTube

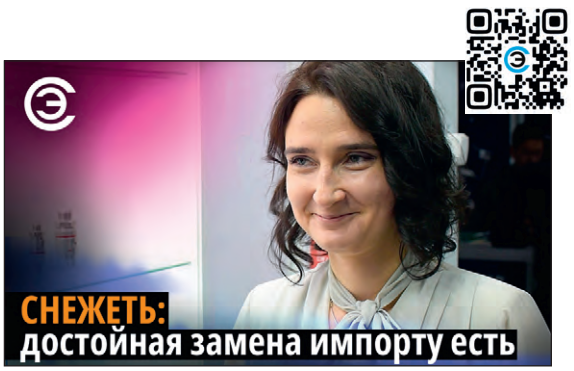
Смотрите на канале СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА



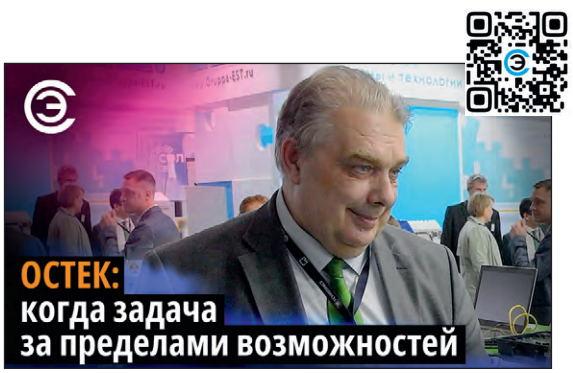
Интервью с Сергеем Сорокиным, генеральным директором ООО «Эремекс»

Интервью с Сергеем Воробьёвым, бренд-менеджером ПРОСОФТ

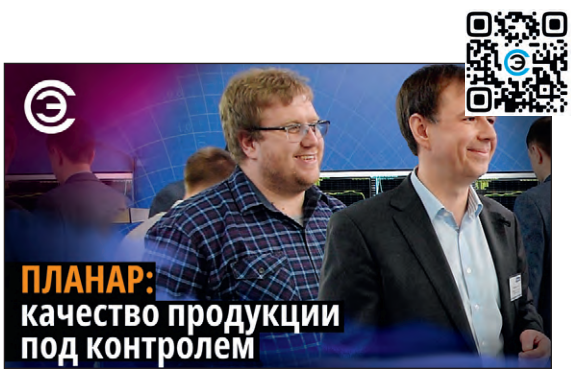
Интервью с Евгением Липкиным, генеральным директором «Остек-Умные технологии»



Интервью с Кристиной Дунаевой, генеральным директором АО “Завод ”Снежеть”



Интервью с Андреем Насоновым, техническим директором ООО «Остек-Электро»



Интервью с руководителем центра решения пользовательских задач «ПЛАНАР-СПб» Евгением Сучковым и инженером «ПЛАНАР» Сергеем Суконкиным

Современная электроника ЖУРНАЛ
СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
www.SOEL.ru

СТА ЖУРНАЛ
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ
www.CTA.ru

Доломант

ЗАО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «ДОЛОМАНТ»

ОТВЕТСТВЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ ЖЕСТКИХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

100% РОССИЙСКАЯ КОМПАНИЯ

ЗАКАЗНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Разработка электронного оборудования по ТЗ заказчика в кратчайшие сроки

- Модификация КД существующего изделия
- Разработка спецвычислителя на базе COM-модуля
- Конфигурирование модульного корпусированного изделия
- Сборка магистрально-модульной системы по спецификации заказчика
- Разработка изделия с нуля

КОНТРАКТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Контрактная сборка электроники уровней: модуль / узел / блок / шкаф / комплекс

- ОКР и технологические консультации
- Макеты, установочные партии, постановка в серию
- Комплектование производства отечественными и импортными компонентами и материалами
- Поддержание складских запасов РЭК и материалов, контролирование жизненного цикла комплектующих
- Серийное плановое производство
- Тестирование и испытания изделий
- Гарантийный и постгарантийный сервис

(495) 232-2033 • WWW.DOLOMANT.RU

Реклама