

# СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

3

2023

В номере:

**ПЛАТА ЗА РАЗВОДКУ ПЛАТЫ:**  
тонкости работы в САПР  
Delta Design

**ТАК ДЕРЖАТЬ:**  
инерциальная навигация  
для систем спутниковой связи

**ХОРОШО ЗАБЫТОЕ СТАРОЕ:**  
СИТ-транзистор побеждает MOSFET

**КВАНТОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ:**  
нанотехнологии, которые изменяют мир


 YouTube


Telegram



-  Полный цикл собственного производства с центрами разработки в Челябинске и Томске
-  Высококвалифицированная команда инженеров-разработчиков
-  Гарантия и сервисное обслуживание
-  Серийное производство ВАЦ и разработка специализированных измерительных решений
-  Широкая линейка аксессуаров и принадлежностей
-  Приемлемые сроки поставки

## СДЕЛАНО В РОССИИ

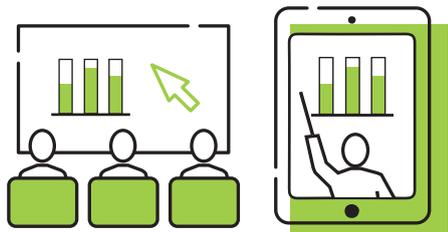

 8 800 222 12 11  
 planarchel.ru



ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ РАЗРАБОТЧИК и ПРОИЗВОДИТЕЛЬ  
ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ МИРОВОГО УРОВНЯ



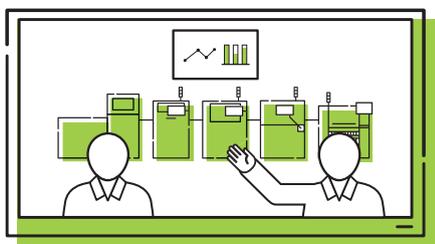
# АКАДЕМИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОСТЕК-СМТ



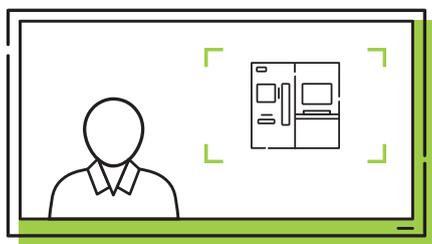
СЕМИНАРЫ  
ОНЛАЙН И ОФЛАЙН



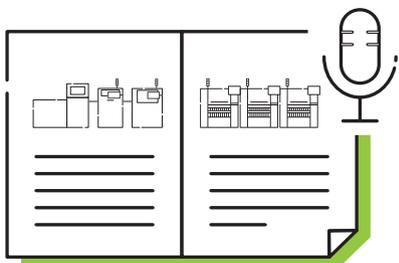
ПРОФИЛЬНЫЕ КАНАЛЫ  
В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ



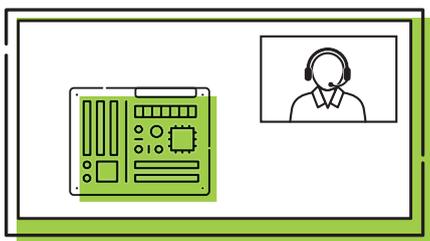
РЕПОРТАЖИ И КЕЙСЫ  
С ПРОИЗВОДСТВ



ВИДЕООБЗОРЫ  
РЕШЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ



ЭКСПЕРТНЫЕ  
СТАТЬИ И ИНТЕРВЬЮ



ВИДЕОПРЕЗЕНТАЦИИ  
И ЗАПИСИ ВЕБИНАРОВ



rus-elektronika.ru



# ЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ

Выставка электронной продукции  
российского производства

28|29|30  
НОЯБРЯ  
2023 МОСКВА  
Крокус Экспо



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



Реклама

Организатор:



Официальная поддержка:



Партнеры:





Здравствуйтесь, уважаемые друзья!

Санкционное давление на страну усиливается. Особо страдают от него высокотехнологичные сферы экономики. Наверное, даже далёкие от электроники люди хоть раз слышали, что у отечественных производителей наблюдаются серьёзные проблемы с поставками электронных компонентов. А вот о прекращении поддержки ведущими мировыми производителями привычного ПО класса САПР для российских пользователей говорят мало. Между тем это означает, что мы рискуем в одночасье лишиться средств разработки электронных устройств. В сложившейся ситуации особенно актуальными становятся отечественные продукты, которые гарантированно сохраняют доступность и поддержку, несмотря ни на какие санкции.

«Современная электроника» начинает цикл статей, посвящённых отечественной САПР для электроники Delta Design. Специалисты предприятий, на которых уже внедрена и успешно работает система Delta Design, расскажут вам о тонкостях и лучшей практике работы с системой. Инженеры и программисты компании Эремекс – разработчика продукта, откроют завесу тайны над перспективными и ведущимися в настоящее время улучшениями этой САПР и приданием ей расширенной функциональности.

Мы продолжим знакомить вас и с другими новинками и событиями мира современной электроники. Заходите на наш постоянно улучшающийся сайт, подписывайтесь на YouTube-канал «Современной электроники», неуклонно набирающий популярность, делитесь ссылками на понравившиеся ролики со своими друзьями и коллегами.

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 1/67/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 3/2023

## РЕКЛАМОДАТЕЛИ

AdvantiX	4-я стр. обл.
Litemax	55
Raystar	51
Ирбис	29
МЕДИАНА-ФИЛЬТР	4
МОРИОН	5
Остек-СМТ	2-я стр. обл., 6
ПЛАНАР	1-я стр. обл., 5
Фаворит-ЭК	5, 27
ЭкспоЭлектроника	23
ЭЛЕКОНД	35
Электроника России	1
Электроника-Транспорт	53
ЭРКОН	5, 21

Читайте в «СТА» № 1/2023:

**ПЕРЕХОДИ НА СТОРОНУ C++**

**НОВЫЙ ДРУГ ЛУЧШЕ СТАРЫХ ДВУХ:**

Куда в АСУТП без Китая?

**ОБЛАКО В ШТАНАХ:**

ИИ в промышленной автоматизации

**ВИДОИЗМЕНЁННЫЙ УГЛЕРОД:**

секрет долголетия карбоновых АКБ



Оформляйте подписку на журнал «СТА»  
и читайте печатную версию  
или электронную версию на [www.cta.ru](http://www.cta.ru)

## РЫНОК

### 4 Новости российского рынка

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

### 8 Практические приёмы эффективной работы в САПР Delta Design

*Анастасия Чекманова*

### 12 Библиотека HDL-тестов для систем моделирования цифровой аппаратуры. Отечественная САПР проектирования микроэлектроники. Часть 1

*Аркадий Поляков, Никита Малышев*

## ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

### 16 Приборы со статической индукцией

*Юрий Максименко, Виктория Грабежова*

### 24 Инерциальные модули ГКВ в системе наведения антенн SOTM

*Александр Бекмачев, Андрей Михеев, Александр Галкин*

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### 30 Модули видеоконтроля и связи, распознавания лиц для терминалов СКУД. Обзор

*Андрей Кашкаров*

### 38 Квантовые электронные компоненты. Часть 1. Молекулярная электроника и квантовые точки

*Виктор Алексеев*

### 48 Инновации устройств IoT, беспилотных моделей в проблематике безопасности обмена данными. Обзор

*Галина Морозоватая*

### 56 Современная электроника в лазерной технике. Новейшие разработки, эксперименты, перспективы. Обзор

*Андрей Кашкаров*

# Новости российского рынка

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Особенности проектирования, монтажа систем получения, хранения и распределения деионизованной воды в производстве электронных компонентов.**

### Как не стоит экономить

Деионизованная вода является одним из ключевых компонентов техпроцесса, около 90% расходуется на промывочные операции, а также применяется для питания вспомогательного оборудования – в системах охлаждения, вентиляции и пр.

В отличие от медицины и фармацевтики, где основная задача состоит в сохранении стерильности, для электронной отрасли важно остаточное содержание ионов, газов и частиц; требования тем жёстче, чем меньше размер выпускаемой продукции. Степень очистки воды приближается к теоретически возможному пределу, поэтому важным мероприятием является не только получение, но и доставка потребителям ДИ-воды без потери качества. Нормативной



научно-производственная компания

документацией предусмотрено проектирование систем распределения ДИ-воды замкнутыми кольцевыми с постоянной циркуляцией в турбулентном режиме, отсутствием застойных зон, из специализированных полимерных материалов (PVDF и др.) и с санитарной арматурой, монтаж должен производиться на специализированном оборудовании обученным персоналом.

Во время оснащения предприятий последнее время часто встречается разделение зон ответственности между подрядчиками по территориальному признаку или как удобно закупщику – по осям здания, этажам, чистым и грязным зонам, не обращая внимания на технологическую связь. Если при проведении ремонтных работ или, например, разводке систем

отопления такой подход незначительно влияет на организацию производства, то при построении высокотехнологичной системы получения, хранения и распределения деионизованной воды её разделение на нескольких подрядчиков разной квалификации – это значительный риск получить несоответствие проектным показателям, брак продукции и отсутствие ответственного.

Специалисты АО «НПК МЕДИАНА-ФИЛЬТР» имеют многолетний опыт проектирования и реализации проектов по подготовке, хранению и распределению деионизованной воды по стандартам отрасли – ОСТ 11-029.003-80 («марка А»), ASTM D5127, SEMI, ГОСТ Р 58431-2019, ГОСТ Р 58144-2018 и готовы комплексно решить ваши задачи. При работе с нами вы получаете «службу одного окна» – компанию, которая отвечает за качество деионизованной воды у каждого потребителя на рабочем месте.

[www.mediana-filter.ru](http://www.mediana-filter.ru)

+7 495 660-0771



## КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕИОНИЗОВАННОЙ ВОДЫ ОТ МАРКИ В ДО Е1.3



- АУДИТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ
- ДЕИОНИЗОВАННАЯ ВОДА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ
- ВОДА ДЛЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
- ВОДА ДЛЯ ЛАБОРАТОРИЙ
- ВОДА ДЛЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ
- СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ (PP, PVDF)
- РЕАГЕНТЫ СОБСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА
- МОНТАЖ, НАЛАДКА, СЕРВИС

ГОСТ Р 58144-2018 • ГОСТ 52501-2005 • ASTM D5127 • SEMI • CLSI • CAP • ISO 3696 • ОСТ 11.029.003 • ГОСТ Р 58431-2019

**ДЛЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ:**

- ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ
- ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
- ПОЛУПРОВОДНИКОВ
- ЖИДКО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЛЕЕВ
- СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

📍 105318, Москва, ул. Ткацкая, д. 1

☎ +7 (495) 660-0771

✉ info@mediana-filter.ru

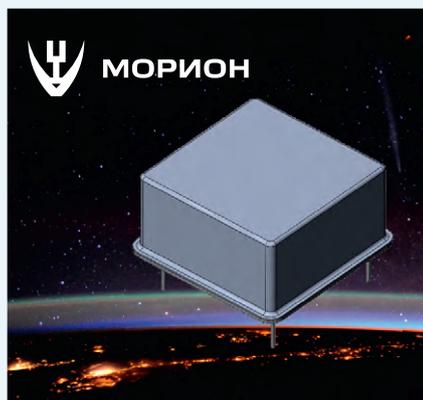
🌐 www.mediana-filter.ru

Реклама

## ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

## Малогабаритные термостатированные кварцевые генераторы для открытого космоса 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 малогабаритные кварцевые генераторы качества ВП для применения в открытом космосе при давлении  $10 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.



Новые генераторы созданы исключительно на российской радиационно-стойкой компонентной базе, в том числе разработанной специально под эти устройства.

Основные характеристики термостатированных кварцевых генераторов:

- диапазон рабочих частот: от 5 до 100 МГц;
- напряжение питания: 5 или 12 В;
- температурная стабильность: до  $\pm 2 \cdot 10^{-9}$ ;
- долговременная стабильность: до  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$  в год;
- фазовые шумы: до -100 дБ/Гц (10 МГц; при отстройке 1 Гц);
- габаритные размеры: 25,4×25,4×12,6 мм;
- накопленная доза: до 100 крад;
- наработка на отказ: до 150 тыс. ч.

Начало поставки прототипов малогабаритных кварцевых генераторов запланировано на конец 2024 года.

Приглашаем посетить наш стенд № А7027 на выставке «ЭкспоЭлектроника-2023» с 11 по 13 апреля в МВЦ «КрокусЭкспо», пав-н 3, зал 15.

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

[www.morion.com.ru](http://www.morion.com.ru)

## Компания Фаворит-ЭК представляет: КТР – новое имя, привычная надёжность

ООО «Фаворит-ЭК» предлагает МЭМС инерциальные датчики, измерительные модули, блоки инерциально-спутниковой навигации. Продукция рассчитана на экс-

плуатацию в расширенном диапазоне температур, способна выдерживать заданные уровни ударов и вибрации без утраты точности и стабильности.



Линейка поставок включает в себя:

- ИМС акселерометра, серии А106, А108.
- Гироскоп 1-осевой в прочном корпусе, серия Н111-300.
- Гироскоп 3-осевой в прочном корпусе, серии Н301 ... Н303.
- Инерциальный измерительный модуль 6-компонентный, серии М301 ... М305.
- Блок инерциальной навигации 6-компонентный, серия М701.
- Блок инерциально-спутниковой навигации, серии М702, М703.

Номенклатура стандартных изделий пополняется, следите за публикациями на нашем сайте.

По запросу возможен выпуск блоков датчиков, ИНС, ИНС+ГНСС с заказными характеристиками по согласованным ТУ в объёме минимальной партии.

[www.favorit-ec.ru](http://www.favorit-ec.ru) / [info@favorit-ec.ru](mailto:info@favorit-ec.ru)  
+7 495 627-7624

## Конструкторские наборы чип-резисторов Р1-8В и чип-индуктивностей КИК и КИФ

АО «НПО «ЭРКОН» предлагает конструкторские наборы чип-резисторов Р1-8В и чип-индуктивностей КИК и КИФ.



Конструкторские наборы подходят инженерам-разработчикам для быстрого опробования, прототипирования и настройки изделий. Также могут использоваться при ремонте РЭС. Наборы позволяют найти необходимый компонент для прототипируемого или ремонтируемого изделия. Удобная упаковка в виде книжки, содержащей отрезки трёхслойной или формованной ленты с компонентами (от 10 шт. каждого номинала в зависимости от типоразмера). Каждый набор содержит

подробное описание типа изделия.

Основные особенности конструкторских наборов чип-резисторов Р1-8В:

- Широкий диапазон номинального сопротивления: 10 Ом ... 1 Мом.
- Типоразмеры: 0402, 0603, 0805, 1206.
- Допускаемое отклонение:  $\pm 1\%$  и  $\pm 5\%$ .
- Наличие чип-перемычек.

Основные особенности конструкторских наборов чип-индуктивностей КИК и КИФ:

- Широкий диапазон номинальной индуктивности: 1 нГн ... 22 000 нГн.
- Типоразмеры 0402, 0603, 0805.
- КИК и КИФ (керамический и ферритовый сердечники).
- Материал финишного покрытия контактных площадок: золото (КИК) и олово (КИФ).
- Допускаемое отклонение:  $\pm 2\%$  и  $\pm 5\%$ .

Более подробная информация о новинках и серийно выпускаемой продукции представлена на сайте [www.erkon-nn.ru](http://www.erkon-nn.ru).

## ПЛАНАР представляет новую модель в линейке усилителей серии ADT со сверхшироким диапазоном частот

ООО «НПК ТАИР» (входит в группу компаний ПЛАНАР) расширяет линейку коаксиальных усилителей серии ADT новой моделью.



Сверхширокополосный коаксиальный усилитель ADT3-0045 обеспечивает усиление сигнала в диапазоне от 10 МГц до 45 ГГц, позволяя заменить несколько узкополосных усилителей и снизить затраты на организацию систем коммутации сигнала и подачи смещения.

Широкий диапазон частот, высокий коэффициент усиления (25 дБ), средний уровень выходной мощности (до +18 дБм) в сочетании с компактными размерами делают усилитель ADT3-0045 универсальным решением как при использовании в составе автоматизированных измерительных систем, так и в лаборатории.

Встроенный DC-DC-преобразователь обеспечивает питание усилителя ADT3-0045 одним напряжением положительной полярности в диапазоне от 11 до 15 В. Дополнительная защита цепей питания от переходных процессов постоянного тока,

перенапряжения и переполюсовки снижает вероятность поломки из-за неправильного обращения.

Использование усилителей ADT3-0045 в составе измерительных систем на базе векторных анализаторов цепей серии Компакт S50244 и S50444 с частотным диапазоном до 44 ГГц и расширителями частоты TFE1854 с частотным диапазоном до 54 ГГц позволяет обеспечить выполнение широкого спектра задач:

- обеспечение требуемого уровня мощ-

ности сигнала;

- измерение параметров активных устройств в режиме компрессии;
- компенсация потерь в трактах распространения сигнала;
- измерение параметров антенных систем.

#### О компании «ПЛАНАР»

Более 30 лет компания «ПЛАНАР» является одним из лидирующих предприятий России, специализирующихся на разработке и производстве высококачественного, конкурентоспособного электронного обо-

рудования. В настоящее время компания быстро развивается, наращивая свои производственные мощности для выпуска широкого спектра телекоммуникационных и контрольно-измерительных решений мирового уровня. «ПЛАНАР» обеспечивает не только гарантию на каждое своё изделие, но и предлагает постгарантийное обслуживание, консультации и техническое сопровождение. Более подробная информация о компании доступна на сайте <https://www.planarchel.ru>.

## СОБЫТИЯ

### Академия технологий Остек-СМТ расширяет границы

Обучающий проект «Академия технологий» от команды Остек-СМТ выходит сразу на двух новых медиа-площадках – в конце зимы дан старт телеграм-каналу «Академия технологий Остек-СМТ» и одноимённому сообществу ВКонтакте.

Создатели проекта решили расширить границы своего присутствия для лучшего и более удобного взаимодействия с коллегами по отрасли, а также для привлечения новых единомышленников не только из среды радиоэлектроники. При этом миссия проекта остаётся неизменной – выход отечественной радиоэлектроники на качественно новый уровень.

Появление новых платформ – это ещё и ответ команды Остек-СМТ на изменения в со-



временной производственной среде. Сегодня перед приборостроительной отраслью, как и перед всей отечественной промышленностью, стоит задача освоить производство практически всего спектра продукции, которую раньше импортировали из-за рубежа, при этом не потеряв позиций в плане качества и функциональности продукции. Речь идёт в том числе и о наиболее сложной и критически значимой аппаратуре.

Для полноценной замены продукции мировых лидеров нужны и производства мирового уровня. А значит, строить и развивать отечественный сегмент надо с учётом лучших мировых практик, позволяю-

щих обеспечить достойный уровень стоимости и качества.

Именно с этой мыслью Остек-СМТ решили перезагрузить проект «Академии технологий» и актуализировать под приоритетные задачи его формат и контент.

На своих новых платформах Академия будет знакомить подписчиков с лучшей мировой практикой и наиболее эффективными решениями для электронной отрасли. К работе планируется привлечь в качестве соавторов как отечественных экспертов с практическим опытом, так и зарубежных партнёров из политически нейтральных стран.

Подписаться на новые каналы и следить за новыми материалами «Академии технологий Остек-СМТ» можно по ссылкам:

<https://t.me/OstecSMT>  
<https://vk.com/ostecsmt>

## НОВОСТИ МИРА

### Образование, продажи, финансовый анализ, генерация контента: китайские технологические компании спешно создают аналоги ChatGPT

Китайские технологические компании планируют разработать свои собственные аналоги системы ChatGPT. Ранее стало известно, что Baidu представит своего чат-бота в марте, а теперь сообщается, что этому примеру последуют Alibaba Group Holding, Tencent Holdings, NetEase и JD.com.

Компания Tencent заявила, что планирует создать аналог ChatGPT, сейчас проводятся исследования. Игровой гигант намеревается использовать чат-бота для генерации контента, но пока не сообщается, когда его выпустят.

JD.com намеревается интегрировать некоторые технологии, лежащие в основе

больших языковых моделей и нейросетей в свои сервисы. Проект называется ChatJD и будет использоваться для работы с задачами розничной торговли и финансов. По данным CNBC, это «промышленная версия» чат-бота, который сможет генерировать контент, а также вести диалог между человеком и компьютером. ChatJD сможет генерировать обзоры продуктов на торговых веб-сайтах или помогать в финансовом анализе.



В компании NetEase, которая занимается играми, изучают возможность использование контента, созданного искусственным интеллектом, в работе образовательного подразделения.

При этом многие мошенники уже создают фейковые аккаунты ChatGPT в китайской социальной сети WeChat, взимая плату за использование. Насколько широко распространилось это явление – пока не сообщается.

[industry-hunter.com](https://www.industry-hunter.com)



# ЧИТАЙТЕ В КОМФОРТЕ



## ПЕЧАТНАЯ ВЕРСИЯ ЖУРНАЛА «СТА»

подписка с гарантированной доставкой



онлайн: [www.cta.ru](http://www.cta.ru) • +7 495 234-0635 • [info@cta.ru](mailto:info@cta.ru)

на почте: по каталогу «Урал-Пресс» (на год – 81872, на полугодие – 72419)

# Практические приёмы эффективной работы в САПР Delta Design

**Анастасия Чекманова** (АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»)

В этой статье хочу рассказать о моём опыте работы в САПР Delta Design и поделиться приёмами, повышающими эффективность работы.

Мой опыт в проектировании устройств микроэлектроники составляет более 20 лет. В мои обязанности входили трассировка печатных плат, подготовка платы к производству, выпуск конструкторской документации и сопровождение изделия на монтажном участке. Я работала в таких САПР, как P-CAD 4.5, P-CAD 8.5, P-CAD 2006, Altium Designer. В настоящее время уже более 3 лет я работаю на крупном оборонном предприятии «Гидроприбор», где занимаюсь разработкой устройств в среде САПР Delta Design. Так как наше предприятие ориентировано на использование отечественного ПО, система сквозного проектирования Delta Design у нас в приоритете. Освоить данное ПО удалось по предоставленным видеоурокам и методическому пособию, а также благодаря оперативной поддержке пользователей разработчиками Delta Design – компанией ЭРЕМЕКС. Большой плюс системы состоит в том, что она под-

держивает оформление КД в соответствии с ГОСТ и интеграцию с такими отечественными системами, как ЛОЦМАН:PLM и КОМПАС-3D, что значительно облегчает совместную работу участников проекта.

Итак, от общих слов перехожу к конкретным моментам, которые могут вам помочь в работе.

## Работа с повторяющимися фрагментами проекта

Одним из плюсов программы являются шаблоны, которые можно повторно использовать, тем самым сократив время проектирования. И не только использовать уже имеющиеся в системе, но и сохранить собственные наработки в виде шаблона.

Например, при создании проекта можно использовать один из предустановленных шаблонов класса точности печатной платы, и тогда Правила трассировки будут сформированы в соответствии с выбранным классом (рис. 1).

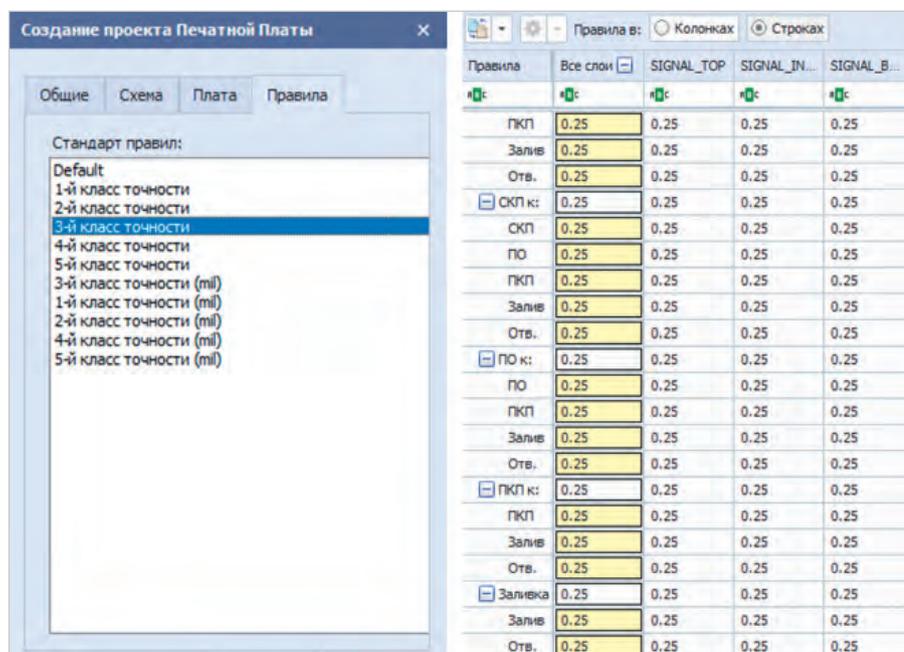


Рис. 1. Задание класса точности печатной платы

## Обозначения компонентов на схеме

При создании компонента в библиотеке ему присваивается буквенный префикс семейства, как и в других САПРах. Зачастую на платах, с которыми я работаю, присутствует такой повторяющийся элемент, который выглядит, как металлизированное отверстие.

Для таких объектов на схеме и плате мне нужно оставить только числовое значение, так как по ГОСТ 2.710-81 «Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах» такие элементы буквенного префикса не имеют (рис. 2). В программе Delta Design в «свойствах» компонента (рис. 3) можно убрать отображение префикса на схеме, а в посадочном месте элемента RefDes заменить на RefDesNumber (рис. 4). Таким образом он будет правильно отображаться и на схеме, и на печатной плате.

## Работа с библиотеками компонентов

За годы работы у меня накопилась очень большая библиотека корпусов в формате P-CAD2006. Delta Design позволяет импортировать библиотеки в P-CAD, которые были выгружены в формате *.Lia (ASCII)*.

Функция импорта из сторонних САПР очень важна, так как позволяет использовать наработанные элементы после внесения небольших дополнений.

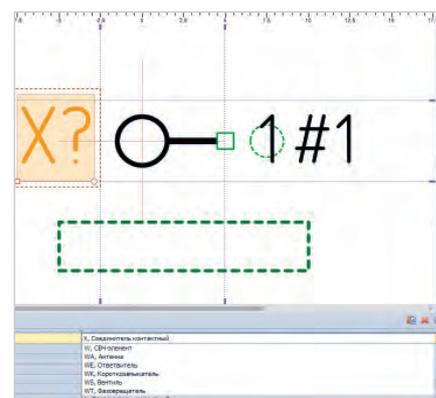


Рис. 2. Обозначение компонента

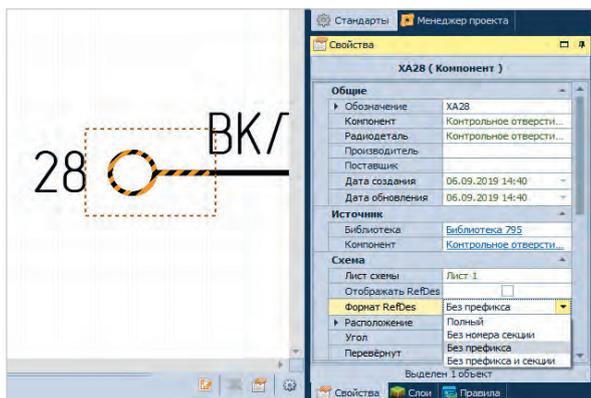


Рис. 3. Свойства компонента



Рис. 4. Свойства посадочного места

В предыдущих версиях Delta Design (до 3.0) надо было делать в библиотеке дополнительный альтернативный вариант УГО (Условное графическое обозначение), когда была необходимость менять контакты местами для оптимизации связей между компонентами. В актуальных версиях системы есть возможность редактировать УГО непосредственно на схеме. Эти изменения не отражаются на библиотеке, но зачастую это не требуется. Очень удобное дополнение (рис. 5).

### Приёмы при проектировании печатной платы

Автоматизированные функции программы Delta Design помогают пользователю значительно сократить время на работу с повторяющимися операциями. Например: при работе с печатной платой есть потребность дублировать группу элементов вместе с фрагментом топологии (рис. 6). В программе Delta Design это осуществляется всего лишь с помощью обычных команд Ctrl+C/Ctrl+V (копировать/вставить).

При размещении новой группы элементов на печатную плату программа предлагает пользователю выбрать элементы для повторяющегося фрагмента топологии из тех, которые уже были использованы при проектировании схемы. После размещения компонентов на печатной плате задаю в Конфигураторе (рис. 7) стандартное переходное отверстие для 3-го класса точности в соответствии с правилами проектирования, это применяется ко всем переходным отверстиям, что сокращает трудозатраты.

При работе с цепями на плате цепи питания трассируют в первую очередь. Я всегда пользуюсь возможностью выделить их разными цветами для наглядности (рис. 8). Это даёт воз-

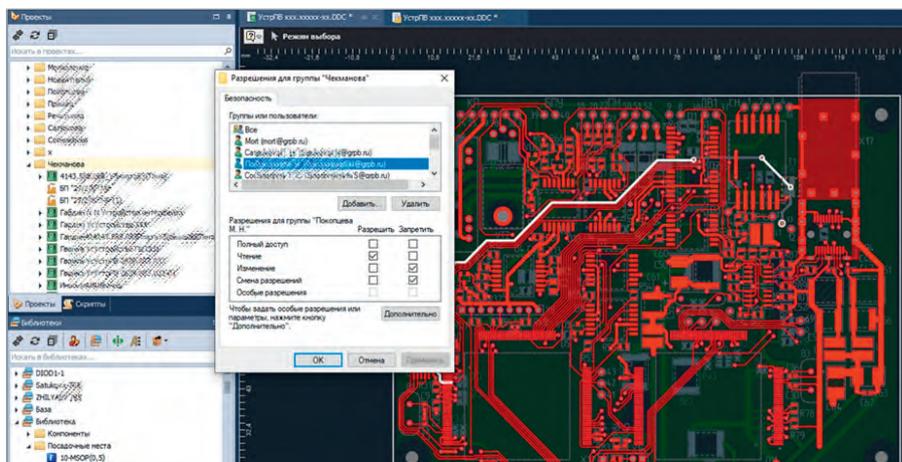


Рис. 5. Установка прав доступа к библиотекам

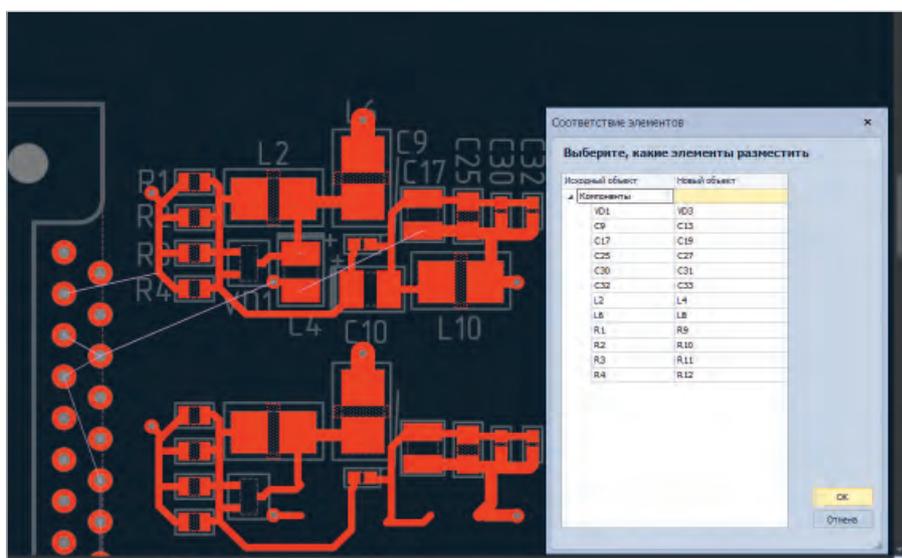


Рис. 6. Размещение повторяющихся групп элементов

можность оптимизировать длину сразу всех шин питания и ориентировать к ним группы элементов.

Также на печатной плате есть возможность переопределить правила в какой-то выбранной зоне, для этого в программе Delta Design есть такие объекты, как «Регион».

Есть возможность создать регион в посадочном месте компонента.

После размещения такого компонента с регионом на печатную плату я могу далее управлять правилами региона в редакторе Правила в печатной плате (рис. 9).

Еще одна интересная возможность – сделать посадочное место, которое уже размещено на плате, уникальным, отредактировав его непосредственно на печатной плате. Исполни-

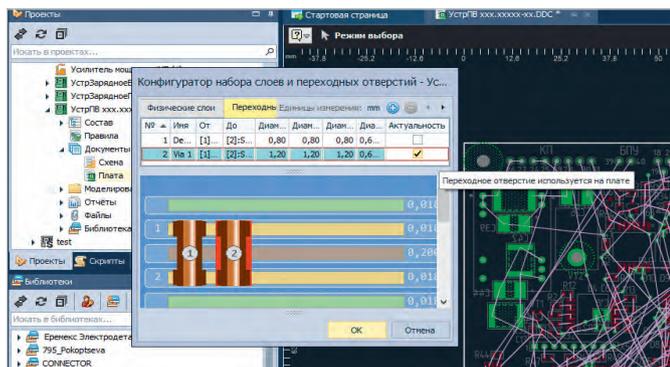


Рис. 7. Конфигуратор набора слоёв

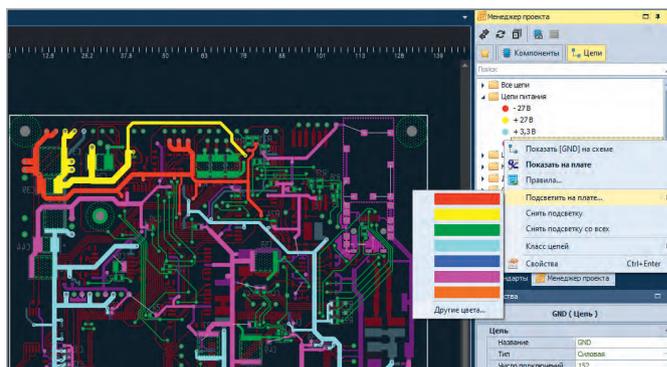


Рис. 8. Выделение цепей питания

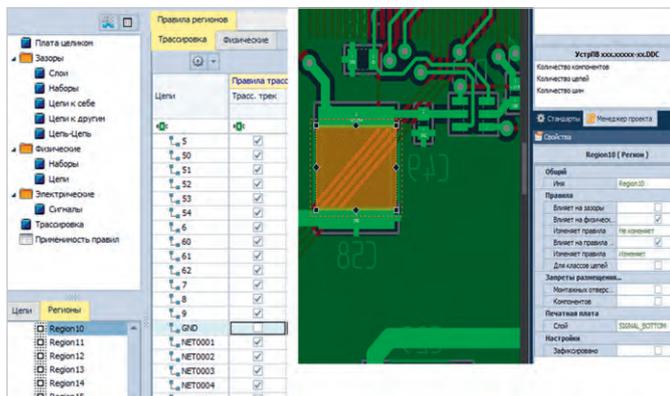


Рис. 9. Установка правил для регионов

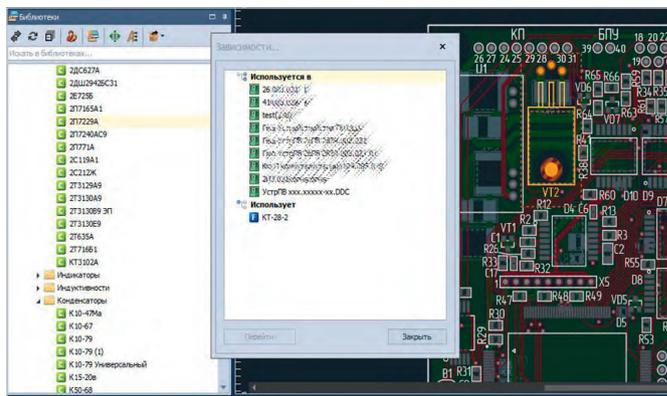


Рис. 10. Поиск зависимостей компонента

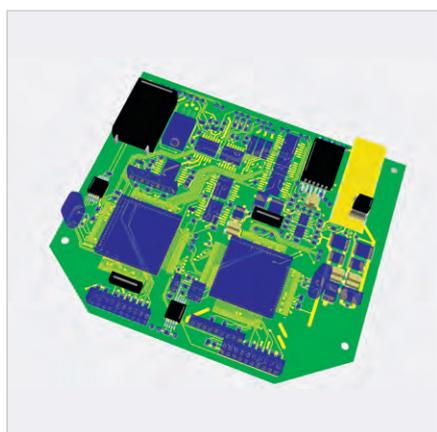


Рис. 11. 3D-представление печатной платы

эту возможность, когда есть наложение графики на слое Top Silk. Внесённые изменения отражаются на всех аналогичных посадочных местах проекта. Такие правки дают существенную экономию времени проектирования.

Следующая полезная функция – это прослеживание взаимосвязей компонентов и элементов компонента. Можно проследить взаимосвязи от контактной площадки через посадочное место, компонент до печатной платы и обратно (рис. 10). Я это использую для того, чтобы указать аналогичный тип формовки в технических требованиях на сборочном чертеже.

### Выпуск файлов производства

В Delta Design, аналогично с CAM350, есть средство просмотра файлов производства. Данный модуль помогает избежать ошибок наложения контуров элементов и надписей друг на друга. Когда трассировка завершена и плата прошла проверку на ошибки, можно выпускать файлы для производства. Это фотошаблоны в формате GERBER и файлы сверловки отверстий, формат DRL, это стандартный исходный продукт, как и у всех аналогичных САПР.

В Delta Design есть просмотрщик слоёв, аналогичный CAM350. В нём я всегда просматриваю плату перед передачей в изготовление. Тут с большой вероятностью можно заметить, например, наложение на контактные площадки контуров компонентов.

### 3D-визуализация

Плата в Delta Design сразу имеет 3D-представление (рис. 11). Если вам нужна детализированная сборка, прикрепляйте к элементам Step-модели, предоставляемые их изготовителями. Мне для совмещения платы с её местом в блоке достаточно габаритного представления с высотами, которое формирует Delta Design.

### Совместная работа

В своей работе на предприятии мы используем реализацию Delta Design Workgroup (версия для рабочей группы), что позволяет использовать стандартизированные наименования элементов и шаблонов и прочие настройки. При этом настройки рабочего пространства для каждого пользователя могут отличаться. Другими словами, каждый пользователь может настроить своё рабочее место под себя.

При создании своей папки с проектами я задаю права доступа к ней участникам моей рабочей группы (на нашем предприятии версия Delta Design для рабочей группы). Также можно настроить и права доступа к библиотекам. Это делает администратор группы.

### Заключение

Delta Design прошла проверку временем и подходит для выполнения моих задач. Мне удобны безусловная связь компонент-схема-плата, возможность просмотреть плату послойно перед запуском в производство, интуитивно понятный интерфейс на русском языке и, что немаловажно, быстрая обратная связь от технической поддержки и разработчиков программы.



# «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



## 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!

# Библиотеки HDL-тестов для систем моделирования цифровой аппаратуры. Отечественная САПР проектирования микроэлектроники. Часть 1

Никита Малышев (ЭРЕМЕКС), Аркадий Поляков (НИУ МЭИ)

В статье рассматриваются вопросы создания HDL-тестов для верификации работы отечественной системы цифрового проектирования и моделирования Delta Design Simtera компании ЭРЕМЕКС.



## Предисловие

Уважаемые читатели, коллеги. Первой статьёй о библиотеках HDL-тестов для систем моделирования цифровой аппаратуры мы открываем серию статей по работе с отечественной системой цифрового моделирования. В статьях мы расскажем о развитии системы за последние годы, а также о пользовательском опыте, особенностях и взаимодействии компании и разработчиков ПЛИС и СБИС по оптимизации функциональности системы. Авторы серией статей:

- Малышев Никита Максимович – ведущий разработчик Delta Design Simtera компании ЭРЕМЕКС;
- Поляков Аркадий Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительные машины, системы и сети» Московского энергетического института (НИУ), лауреат премии Фонда развития МЭИ «Почёт и признание поколений», в конце 90-х и начале 2000-х годов – ведущий инженер компаний SEVA и INTRINSIX в Кремниевой долине США.

Благодаря активному взаимодействию авторов на протяжении трёх лет, начиная с выхода первых альфа-версий Delta Design Simtera, накопилось множество материалов, которыми мы решили поделиться и рассказать о сложностях разработки САПР и альфа-тестирования системы.

Благодаря активному взаимодействию авторов на протяжении трёх лет, начиная с выхода первых альфа-версий Delta Design Simtera, накопилось множество материалов, которыми мы решили поделиться и рассказать о сложностях разработки САПР и альфа-тестирования системы.

## Введение

Подавляющее число систем цифрового моделирования, базирующихся на HDL-языках описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog), разработаны в США фирмами Synopsys,

Cadence, MentorGraphics, Xilinx, Aldec и др.

Если в СССР в своё время имелось несколько систем моделирования, базировавшихся на отечественных высокоуровневых языках моделирования цифровой аппаратуры типа МОДИС-ВЕС, Алгоритм и др., то после распада страны в 90-х годах работы в этой области почти не велись.

Система цифрового моделирования Delta Design Simtera (далее Simtera) компании ЭРЕМЕКС [1] является первой из отечественных систем, базирующихся на HDL-языках описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) и их расширениях, ориентированных на моделирование аналоговых систем: Verilog-AMS.

Simtera в самом начале пути своего развития позиционировался как модуль цифрового моделирования в составе программного пакета Delta Design – комплексной среды сквозного проектирования электронных устройств и в том числе печатных плат. Она включает в себя множество отдельных модулей – начиная от ведения библиотек и заканчивая подготовкой данных для производства. Развитие программного пакета Simtera началось ещё в начале 2010-х годов (сам DeltaDesign и топологический роутер TopoR – ещё десятилетием ранее), до первых западных санкций. Тогда Simtera представлял из себя отдельный программный пакет по моделированию VHDL-кода. С тех пор позиционирование этого продукта изменилось в сторону расширения функциональности ввиду спроса и внешних обстоятельств. Это и расширение набора поддерживаемых HDL, и подключение системы синтеза и имплементации.

Таблица 1. Коммерческая библиотека BEACON для верификации систем цифрового моделирования

Название блока библиотеки BEACON	Назначение и количество тестов
Beacon-SV	Тесты SystemVerilog – более 5000 тестов проверки САПР на реализацию различных версий языка SystemVerilog стандартов IEEE 1800-2012, IEEE 1800-2009, IEEE 1800-2005
Beacon-SV MX	Тесты SystemVerilog/VHDL – более 1500 тестов проверки на реализацию смешанных SystemVerilog/VHDL описаний
Beacon-MX	Тесты Verilog/VHDL – более 700 тестов проверки САПР на реализацию смешанных Verilog/VHDL описаний
Beacon-PSL	Тесты PSL (PSL язык спецификации свойств) – более 2000 тестов проверки САПР на реализацию специальных конструкций Verilog и VHDL на соответствие стандарту PSL IEEE 1850-2005
Beacon VHDL-2008	Тесты VHDL-2008 – более 3000 тестов проверки САПР на реализацию стандарта VHDL IEEE 1076-2008
Beacon-RTL-VHDL	Тесты RTL VHDL – более 2100 тестов проверки САПР на реализацию / не реализацию синтезательных подмножеств VHDL-87, VHDL-93
Beacon-RTL-Verilog	Тесты RTL Verilog – более 2100 тестов проверки САПР на реализацию / не реализацию синтезательного подмножества Verilog IEEE 1364-1995, IEEE 1364-2001

Таблица 2. Набор тестов библиотеки *Beacon-2k1*

Проверяемые наборами блока <i>Beacon-2k1</i> конструкции языка Verilog	Количество тестов в наборе
ANSI Style Ports	73
AUTO Width Extension	16
Multy Dimension Arrays	446
Continuous Assignments without Net Declarations	30
Attributes	537
Event Control	32
Combination of Constructs	1773
Configuration	221
Constant Functions	65
Combined port/data	221
Disable Default Net	8
Compiler Directives	15
Command Parsing	14
SDF File Supports	3
VCD Enhancement	18
File IO	50
Generate Statement	367
Instance Array	30
Negative Pulse Detection	37
Arithmetic Operators	53
PLA Modeling	25
Parameters	492
Indexed Part Select	442
Pulse Error Propagation	20
Signed Arithmetic	53
Reentrant Task/ Functions	28
Timing Checks	44
Variable Declaration Assignments	62
Verilog 2005	196
Суммарное количество тестов	5254

ции проектов на ПЛИС. В настоящее время использовать *Simtera* можно как отдельно, если мы говорим о проектировании конфигурации ПЛИС и архитектуры микросхем, так и в составе *Delta Design* – здесь этот модуль можно использовать для моделирования цифровых блоков в составе проектируемого радиоэлектронного изделия.

Одним из важнейших требований к системам, подобным *Simtera*, является отсутствие ошибок – параметр, зависящий в том числе от полноты тестирования (верификации) и устойчивости в работе.

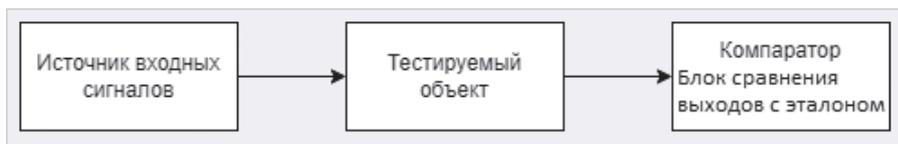


Рис. 1. Типичная структура HDL-тестбенча

### Библиотека тестов

Объём работ, связанных с разработкой библиотек тестов для верификации HDL-систем цифрового моделирования, можно проиллюстрировать параметрами коммерческой библиотеки *BEACON* компании *InterraSystems* [2], представленными в табл. 1.

Если считать, что в среднем каждый тест содержит 10–20 строк HDL-кода, то общий объём таких библиотек 200 000–400 000 строк. Следует учесть, что обычно отдельный простой тест проверяет САПР на реализацию только одной из конструкций языка. Соответственно, необходимы наборы более сложных тестов, проверяющих реализацию совокупности конструкций языков, контролируемых предельные размеры HDL-описаний, объём занимаемой моделями памяти инструментальных ЭВМ и т.п.

Что касается самих тестов, то кроме обычных требований простоты и наглядности HDL-описаний, наличия как позитивных, так и негативных тестов, полноты покрытия конструкций языка и т.п. также учитывается требование возможности интеграции тестов в тестовые наборы, так называемые регрессионные тесты, простоты настройки на изменения стандартов языка и др. Как пример, в табл. 2 представлены параметры набора Verilog-тестов *Beacon-2k1* компании *InterraSystems*.

Типичная структура HDL-тестбенча – модуля, реализующего проверку тестируемого объекта, представлена на рис. 1.

Она включает модель источника входных сигналов, модель тестируемого объекта и компаратора.

### Простые тесты

Простейший тест, используемый для верификации системы моделирования, обычно не содержит отдельный блок – источник входных сигналов, а состоит из операторов, включающих исследуемую на реализуемость конструкцию языка и модель компаратора – блока проверки совпадения выходов тестируемого объекта с эталоном.

Такой подход к организации тестов реализован, например, в свободно рас-

```

`timescale 1ns / 100 ps
module test;
reg [1:4] a;
reg [4:1] b;
integer i;
initial
begin
a = 4'b1100;
for (i = 1; i <= 4; i = i + 1)
begin
#1;b[i] = a[i];
end
$display("a=%b, b=%b", a, b);
if (b !== 4'b0011)
begin
$display("FAILED -- b == %b", b);$finish;
end
#10;
$display("PASSED");
end
endmodule
    
```

Рис. 2. Тест проверки правильности выполнения верифицируемой САПР операции с разрядами векторов

пространяемом наборе Verilog-тестов *IVLTests*, использовавшемся при разработке системы моделирования *IcarusVerilog* [3]. Набор содержит примерно 2000 тестов, что гораздо меньше, чем в наборе *Beacon-2k1*. Тесты организованы как одномодульные тестбенчи, внутри которых все компоненты представлены последовательностями HDL-операторов. Каждый тест – это отдельный файл, название которого отражает проверяемую конструкцию языка и её вариант.

Как пример, ниже приведён один из файлов библиотеки *IVLTests* – файл *bitsel2.v*. Это тест проверки правильности выполнения верифицируемой САПР операции с разрядами векторов. Разряды четырёхразрядного вектора **a = 1100** в обратном порядке должны быть переписаны в вектор **b**, и в результате **b** должно быть равно **0011**. Если результат не такой, на консоль выдаётся сообщение **FAILED**, значение **b** и происходит останов моделирования, иначе в конце моделирования выдаётся сообщение **PASSED** (рис. 2).

Результаты прогона теста *bitsel2.v* на *Simtera* с временными диаграммами (осциллограф) и данными на консоли (справа) представлены на рис. 3.

Для верификации самих HDL-тестов разработчиками *Simtera* в основном

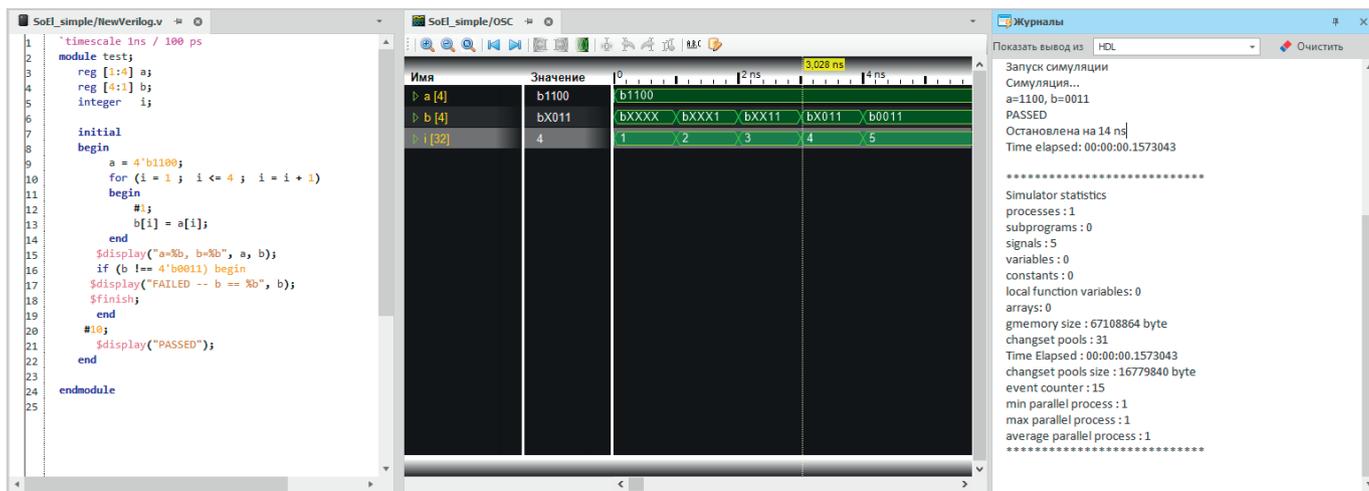


Рис. 3. Результаты проверки работы Simtera на тесте bitsel2.v (тесты IcarusVerilog)

```

`timescale 1ns / 1ps
// Company: NIIVK
// Engineer: POLIAKOV
// Design Name: 74XX LIB
// Module Name: TTL_7400 4 nand gates

module ttl_7400 #(parameter BLOCKS = 4,WIDTH_IN=2,
DELAY_RISE = 5, DELAY_FALL = 3)
(input [BLOCKS*WIDTH_IN-1:0] A,output [BLOCKS-1:0] Y);

reg [BLOCKS-1:0] computed;
reg tmp3[0:BLOCKS-1];
integer i,j, k;
reg tmp, tmp1;
always @(*)
begin
k=0;
for (i = 0; i <BLOCKS*WIDTH_IN; i=i+WIDTH_IN)
begin
tmp=A[i];
for (j = 0; j <WIDTH_IN ; j=j+1)begin
tmp=tmp &A[i+j];
end
tmp1= ~tmp;
tmp3[k]=tmp1;k=k+1;
end
computed={tmp3[3],tmp3[2],tmp3[1],tmp3[0]};
end
assign #(DELAY_RISE, DELAY_FALL) Y = computed;
endmodule
    
```

Рис. 4. Модифицированное описание микросхемы из четырёх элементов 2 ИНЕ

как эталонные используются системы «большой тройки» – Siemens, Cadence, Synopsys, и в некоторых случаях система моделирования XSIM, встроенная в САПР ПЛИС Vivado от Xilinx.

### Сложные тесты

Помимо наборов тестов, предназначенных для проверки системы моделирования Simtera и покрывающих язык Verilog, приходится разрабатывать тесты, охватывающие синтезательное подмножество языка, по типу Veason-RTL-Verilog. Такие тесты пригодны также для верификации систем синтеза и имплементации логических схем. В таких тестах в виде отдельных модулей, а также отдельных файлов,

```

`timescale 1ns / 1ps
`include "ttl_7400_tb.v"
// Company: NIIVK
// Engineer: POLIAKOV
// Module Name: test
// Project Name:SIMTERA testsuit and 74XX_LIBRARIES model DESIGN
// Target Devices: TTL_7400 four nand gates unit
module test #(parameter
BLOCKS=4,WIDTH_IN=2,DELAY_RISE=5,DELAY_FALL=3) ();
// DUT inputs
reg [BLOCKS * WIDTH_IN-1:0] A;
// DUT outputs
wire [BLOCKS-1:0] Y;
integer i;
integer FAILED=0;
time DELAY_MAX;
//task
task MAX_DEL;
if (DELAY_FALL > DELAY_RISE) DELAY_MAX= DELAY_FALL ;else
DELAY_MAX= DELAY_RISE ;
endtask
reg [WIDTH_IN-1:0] Block1;reg [WIDTH_IN-1:0] Block2;
reg [WIDTH_IN-1:0] Block3;reg [WIDTH_IN-1:0] Block4;
// DUT-UUT-ИНСТАЛЛЯЦИЯ модуля ttl_7400
ttl_7400 dut(.A(A),.Y(Y));

initial
begin
#100; //задержка на начальный период установки сигналов
// в кристалле ПЛИС
// все входы микросхемы в 1, ожидается выходы=0
Block1 = {WIDTH_IN{1'b1}}; Block2 = {WIDTH_IN{1'b1}};
Block3 = {WIDTH_IN{1'b1}}; Block4 = {WIDTH_IN{1'b1}};
A = { Block4, Block3, Block2, Block1};
#DELAY_FALL; #0.1;
for (i = 0; i <BLOCKS; i=i+1) begin
if (Y[i] != 1'b0) $display("FAILED");
end
end
// all zeroes -> 1, enough time for output to rise
Block1 = {WIDTH_IN{1'b0}}; Block2 = {WIDTH_IN{1'b0}};
Block3 = {WIDTH_IN{1'b0}}; Block4 = {WIDTH_IN{1'b0}};
A = { Block4, Block3, Block2, Block1};
#DELAY_RISE; #0.1;
for (i = 0; i <BLOCKS; i=i+1)
begin
if (Y[i] != 1'b1) $display("FAILED");
end
end
// Остальные тестовые наборы для сокращения объёма статьи опущены
#100
$display (" PASSED ");
end
endmodule
    
```

Рис. 5. Тестбенч для верификации синтеза и имплементации

разделяются описания синтезируемого объекта и использующего его тестбенча.

В качестве примера ниже (рис. 4) приводится модифицированное (оригинал – тест из библиотеки IceChipsТима Руди [4]) описание микросхемы из четырёх элементов 2 ИНЕ (микросхема 4-2ИНЕ, в серии 74 обозначаемая как 7400) и её тестбенча (соответственно файлы ttl\_7400.v и ttl\_7400\_tb.v). Описание микросхемы

7400 параметризовано, что позволяет при желании настраивать модель на значения задержек разных серий микросхем при поведенческом моделировании. Подобные модели, например, можно включать в библиотеку схемотехнического моделирования Simtera и Delta Design [5].

Приведённый ниже тестбенч (рис. 5) нами параметризован и может использоваться не только для верификации системы моделирования Simtera, но и для верификации синтеза и имплементации. В последнем случае при временном или посттрассировочном моделировании параметры задержек DELAY\_RISE = 5, DELAY\_FALL = 3 схемы 4-2ИНЕ заменяются в тестбенче на задержки, рассчитываемые САПР после трассировки сигналов в имплементируемой схеме.

Результаты прогона теста на Simtera выведенными (осциллограф) временными диаграммами и данными на консоли представлены на рис. 6.

На момент написания статьи синтез ttl\_7400.v ещё не поддерживался в Simtera, тем не менее в системе регрессионного тестирования заложены тесты поведенческого и логического синтеза. На рис. 7 представлены результаты синтеза поведенческого Verilog описания полного сумматора (test ex4\_7.v) (описание заимствовано из книги Дэвида и Сары Харриссов [6]) с использованием двух синтезаторов – синтезатора, встроенного в Simtera, HDL операторов синтезатора с открытым кодом.

### Заключение

Система моделирования Delta Design Simtera в настоящее время находится на стадии бета-тестирования подсистем поведенческого моделирования и синтеза на базе языков Verilog и SystemVerilog.

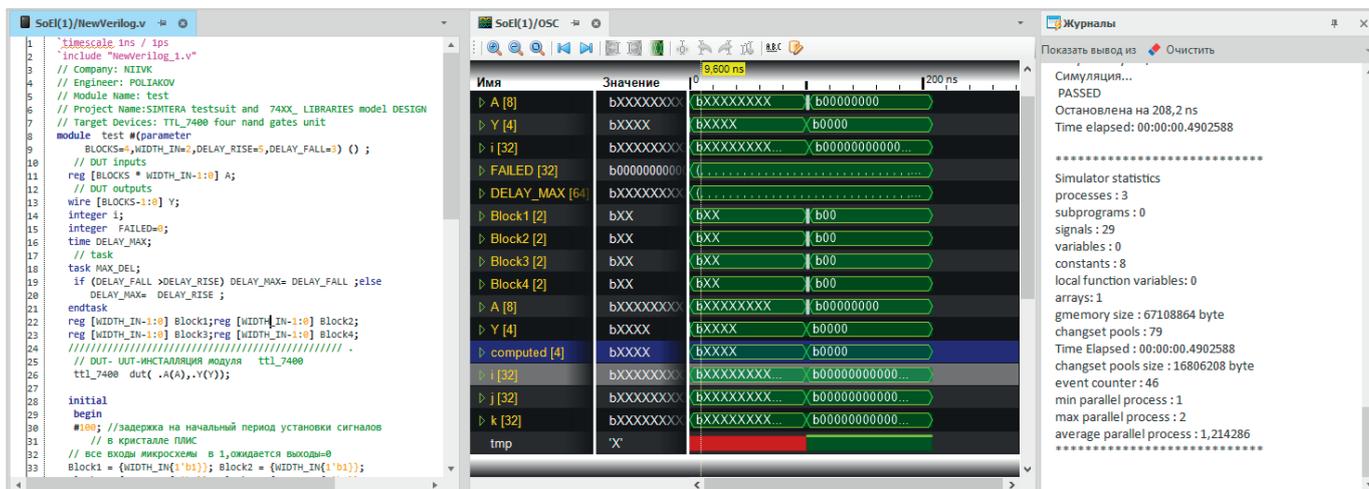


Рис. 6. Результаты проверки работы Simtera на тесте из файлов ttl\_7400.v и ttl\_7400\_tb.v (описание микросхемы из четырёх элементов 2 ИНЕ-7400 и её тестбенча)

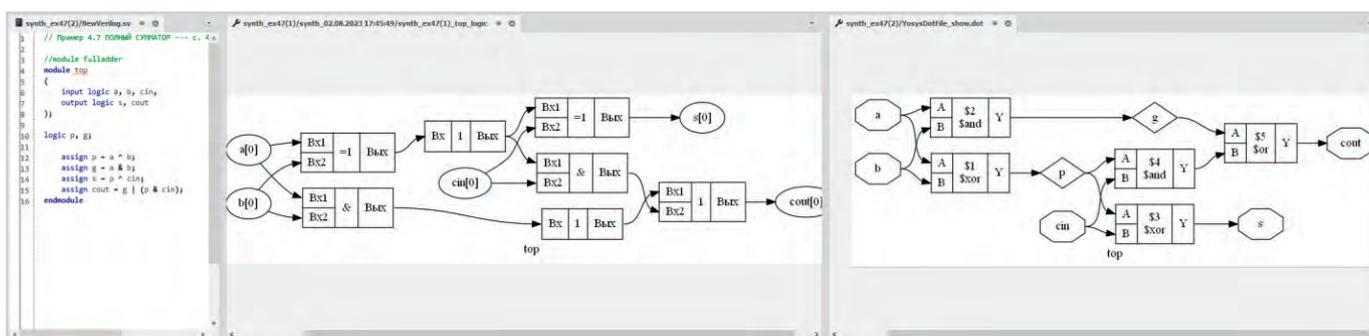


Рис. 7. Результаты синтеза полного сумматора (ex4\_7.v) в Simtera (центр) и в синтезаторе с открытым исходным кодом (справа)

Учитывая большой объём работ по созданию отечественной библиотеки HDL-тестов, разработчики САПР Delta Design Simtera будут весьма признательны всем читателям, которые смогут приложить им самопроверяющиеся тесты.

Напоминаем также, что открыто бета-тестирование Delta Design Simtera, и получить версию системы можно, написав на адрес info@eremex.ru или в Telegram-сообществе.

### Литература

1. Малышев Н. Цифровое моделирование цифровых и цифро-аналоговых узлов в системе Delta Design Simtera // Современная электроника. 2021. № 1. С. 60–61.
2. Interra EDA Solution. URL: [http://www.interradesign.com/hdl\\_test\\_suits.php](http://www.interradesign.com/hdl_test_suits.php).
3. Icarus Verilog Test Suite. URL: <https://sourceforge.net/projects/ivtest/>.
4. TimRudy/ice-chips-verilog. URL: <https://github.com/TimRudy/ice-chips-verilog>.
5. Смирнов А., Гимеин А. Схемотехническое моделирование Delta Design SimOne // Современная электроника. 2021. № 9. С. 34–36.
6. Дэвид М. Харрис, Сара Л. Харрис Цифровая схематехника и архитектура компьютера. / пер. с англ. Imagination Technologies. – М.: ДМК Пресс, 2018 – 792 с.: цв. ил. УДК 004.2+744.4 ББК 32.971.3

## НОВОСТИ МИРА

### США готовят запрет на инвестиции в технологический сектор КНР – СМИ

Администрация Джо Байдена намерена ввести полный запрет на инвестиции в некоторые IT-компании Китая и отслеживать деятельность ряда китайских организаций, сообщило в пятницу агентство Reuters со ссылкой на собственные источники.

Авторы инициативы винят инвесторов из США в переводе денежных средств и передаче ценных ноу-хау китайским технологическим компаниям, что, по их мнению, мо-

жет способствовать наращиванию военного потенциала Пекина.

По данным источников, запрет коснётся инвестиций в производство чипов. Инициатива также позволит отслеживать соблюдение введённых ранее ограничений на экспорт в Китай американских чипов для продуктов с применением искусственного интеллекта, оборудования для производства микросхем, суперкомпьютеров и ряда других товаров.

Ожидается, что запрет будет оформлен в виде исполнительного указа президента США. Опубликовать документ планируется «в ближайшие месяцы».



Напомним, США давят на союзников по всему миру для того, чтобы ограничить возможности КНР развивать свой технологический сектор. В частности, Вашингтон потребовал от Нидерландов и Японии ввести запрет на поставку оборудования для производства чипов в Китай.

industry-hunter.com

# Приборы со статической индукцией

Юрий Максименко, Виктория Грабежова  
ООО «Дизайн-центр биомикроэлектронных технологий “Вега”»

Рассмотрена история появления и развития нового класса приборов на Si – приборов со статической индукцией, которые способны работать как в полевом, так и в биполярном режиме. Предложены новые конструктивно-технологические пути построения СИТ и БСИТ с уникальными ключевыми параметрами, создание которых особенно необходимо для таких отраслей, как самолётостроение и электротранспорт. Технологические пути построения предлагаемых приборов базируются на хорошо освоенных в серийном производстве приёмах, что позволяет создавать их с низкой себестоимостью. Проведён сравнительный анализ по основным ключевым параметрам предлагаемых приборов с лучшими высоковольтными приборами на SiC и GaN. Показано, что предлагаемые приборы по основным ключевым параметрам существенно их превосходят. Замена в СИТ обычного p<sup>+</sup>-истока на изотипный гетеропереход, возможно, позволит перейти на новый физический принцип движения тока в полупроводнике – с зонного на фононный.

## Введение

Сегодня с быстрым развитием электрифицированных отраслей, таких как электротранспорт, самолётостроение, средства электропитания и т.д., очень актуальным становится создание эффективных (идеальных) ключей. Ключевые высоковольтные приборы IGBT 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 и GaN). В России из-за отсутствия технологий по созданию широкозонных материалов SiC и GaN работы по созданию таких приборов находятся на начальных этапах.

Авторами данной статьи разработаны новые конструктивно-технологические приёмы построения высоковольтных приборов со статической индукцией (СИТ) на Si, которые позволят создать приборы, превосходящими по параметрам лучшие зарубежные приборы на SiC и GaN.

История появления приборов с электростатическим управлением началась с опубликованной в 1952 году работы W. Shockly, в которой дано теоретическое описание «униполярного полевого транзистора» [1]. Принцип его

действия основан на модуляции тока основных носителей заряда за счёт изменения толщины проводящего канала, обусловленного изменением обеднённой области p-n-перехода.

В процессе разработки и исследований полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом (ПТУП) было обнаружено, что в ряде случаев выходные вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторов в теории имели не «пентодный», а «триодный» вид [2–4]. Однако объяснить это явление и воспроизвести структуры, обладающие ненасыщающимися выходными ВАХ, авторам этих работ не удалось.

Изучение ПТУП с «триодными» ВАХ было впервые проведено профессором Нишизаовой [5]. В его работе ненасыщенные характеристики базировались на использовании эффекта отрицательной обратной связи в ПТУП, обусловленной наличием сопротивления канала. При этом считалось, что величина последовательного сопротивления канала в случае пентодных характеристик после достижения напряжения смыкания определяется протяжённостью обеднённой области канала, которая, в свою очередь, зависит как от напряжения затвористок ( $U_{зи}$ ), так и от величины омического падения напряжения, обусловленного протеканием тока по каналу. С увеличением тока стока, вызванно-

го приращением напряжения на стоке ( $U_{си}$ ), падение напряжения в канале возрастает, вызывая увеличение напряжения на управляющем p-n-переходе и расширение его области пространственного заряда (ОПЗ). В итоге протяжённость обеднённой области канала увеличивается, растёт его сопротивление, что приводит к уменьшению приращения протекающего через канал тока. Отметим, что аналогичный механизм насыщения ВАХ ПТУП описан и С.М. Зи [6].

Согласно работам [5, 6] крутизна транзистора в насыщенном режиме определяется соотношением:

$$S = \frac{S^*}{1 + R_u \cdot S^*}, \quad (2)$$

где  $S^*$  – крутизна транзистора, не охваченного отрицательной обратной связью.

Вводя определения выходного сопротивления прибора:

$$r_{\text{вых}} = \frac{dU_{\text{си}}}{dI_c} = \text{const} = \frac{dU_{\text{си}}}{dU_{\text{зи}}} \cdot \frac{dU_{\text{зи}}}{dI_c} \quad (3)$$

и коэффициента усиления по напряжению

$$\mu = \frac{dU_{\text{си}}}{dU_{\text{зи}}} \cdot I_c = \text{const}, \quad (3)$$

авторы [5] получили:

$$r_{\text{вых}} = \mu \cdot \frac{1}{S} + R_c, \quad (4)$$

где  $R_c$  – сопротивление в цепи стока, включённое последовательно с сопротивлением канала;

$I_c$  – ток стока;

$U_{\text{си}}$  – напряжение между стоком и истоком;

$U_{\text{зи}}$  – напряжение между затвором и истоком;

$S$  – крутизна.

С возрастанием напряжения на стоке величина  $R_u$ , согласно [5], увеличивается, величина  $R_u \cdot S^*$  становится намного больше единицы и, как следует из (1) и (4), выходное сопротивление прибора стремится к величине

$$r_{\text{вых}} = \mu \cdot R_u + R_c. \quad (5)$$

Из этого соотношения следует, что при определении  $\mu$  как константы, зависящей от электрофизических параметров прибора, выходное сопротивление определяется сопротивлением канала. В [5] было предположено, что

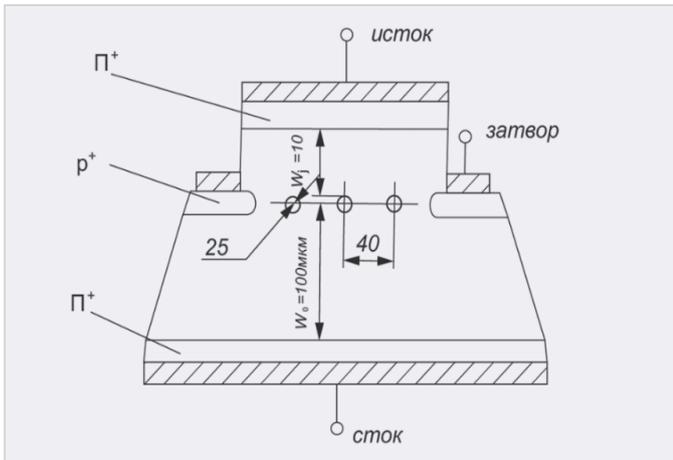


Рис. 1. Структура кристалла транзистора со статической индукцией [5]

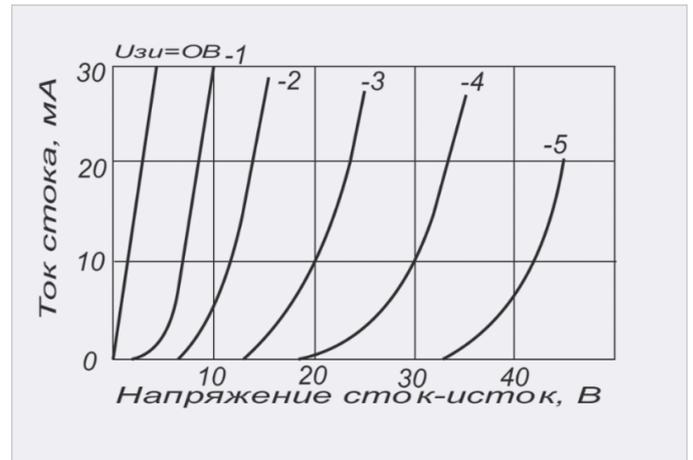


Рис. 2. Выходные ВАХ транзистора со статической индукцией [5]

при значительном снижении  $R_{и}$  по сравнению с существующими аналогами может не только повышаться крутизна транзистора  $S$ , но и существенно уменьшаться его выходное сопротивление, что, в свою очередь, должно привести к изменению вида выходных вольт-амперных характеристик.

На основе этих качественных положений авторами [5] была предложена конструкция транзистора с управляющим p-n-переходом, отличающаяся от ранее известных конструкций очень малым расстоянием между затвором и истоком, малыми размерами областей затвора, близких по форме к цилиндрическим, и очень низкой концентрацией примеси в канале. Схематически конструкция прибора представлена на рис. 1, а его выходные характеристики – на рис. 2. Как следует из рис. 2, транзистор с этой конструкцией имеет ненасыщающиеся исходные характеристики «триодного» типа. Появление таких характеристик связывается с выполнением соотношения  $R_{и} \cdot S^* < 1$  во всей рабочей области значений токов и напряжений стока [7].

По принятой к настоящему времени в литературе терминологии данный прибор является транзистором со статической индукцией со скрытым (захороненным) затвором. Принцип его действия сводится к следующему. При отсутствии напряжения на затворе ( $U_{зи} = 0$ ) каналы «открыты», и ВАХ транзистора близка к ВАХ полупроводникового  $n^+ - n^- - n^+$ -резистора. С увеличением обратного напряжения на управляющем p<sup>+</sup>-n<sup>-</sup>-переходе его ОПЗ расширяется и перекрывает канал, вызывая отсечку тока стока.

Ввиду малой глубины отрицательной обратной связи, обусловленной

малым значением  $R_{и}$ , прибор является «плохим генератором тока» и может быть заблокирован относительно невысоким потенциалом затвора при заданном  $U_{си}$ . Напряжённость электрического поля вблизи истока p<sup>+</sup>-затворов на стадии блокирования оказывается направленной таким образом, что выходящие из истока электроны тормозятся и не могут преодолеть возникший потенциальный барьер. Напряжённость поля в любой точке вдоль канала является векторной суммой напряжённостей тормозящего поля затвора  $\vec{E}_1$  и ускоряющего поля стока  $\vec{E}_2$  (исток обычно соединяется с землей). При возрастании напряжения на стоке напряжённость увеличивается:

$$\Delta E_2 \approx \frac{\Delta U_{си}}{W_0}, \quad (6)$$

где  $\Delta U_{си}$  – приращение напряжения сток-исток;

$W_0$  – расстояние между электронной-нейтральной областью стока и «внутренним» затвором.

В нулевом приближении приращение напряжённости поля затвора можно определить из соотношения [5]:

$$\Delta E_2 \approx \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta W_3}, \quad (7)$$

где  $W_3$  – расстояние между электронной-нейтральной областью истока и «внутренним» затвором.

При неизменном  $U_{зи}$  и возрастании  $U_{си}$   $\vec{E}_1$  неизменен, а  $\vec{E}_2$  увеличивается, и при выполнении условия

$$\vec{E}_1 > \vec{E}_2 \quad (8)$$

ток в канале возобновляется, т.е. прибор открывается напряжением на стоке. Из соотношений (6)–(8) можно оценить коэффициент усиления по напряжению таких структур:

$$\mu = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \approx \frac{W_0}{W_3}. \quad (9)$$

На основании рассмотренных механизмов включения и запирания в работе [5] предложено назвать приборы этого типа «приборами со статической индукцией» (англ. – Static Induction Transistor – SIT), поскольку их работа основана на эффекте статической индукции через объёмно-заряженный диэлектрик.

Дальнейшие исследования выходных ВАХ, проведённые в работе [8], показали, что в области малых значений ток стока растёт экспоненциально при увеличении  $U_{си}$ . В области больших значений токов выходные ВАХ приближаются к линейным, что связывают с увеличением сопротивления канала и приближением произведения  $R_{и} \cdot S^*$  к единице. Наконец, в области весьма больших значений токов стока, которые зачастую не достигаются в реальных приборах в допустимых рабочих режимах, эффект сужения канала вследствие омического падения напряжения на его сопротивлении становится доминирующим, и ВАХ транзистора переходят в «квазипентодные», подобно ВАХ полевых транзисторов с длинным каналом.

Распределение потенциала по оси канала транзистора со статической индукцией показано на рис. 3.

С ростом напряжения стока потенциальный барьер, обусловленный действием обратнорасположенного p-n-перехода затвора, понижается и сдвигается в сторону истока [9]. Эффект уменьшения высоты барьера, препятствующего протеканию основных носителей заряда в канале, эквивалентен повышению прямого смещения на обычном p-n-переходе с той лишь разницей, что в СИТ проводимость обусловлена только одним

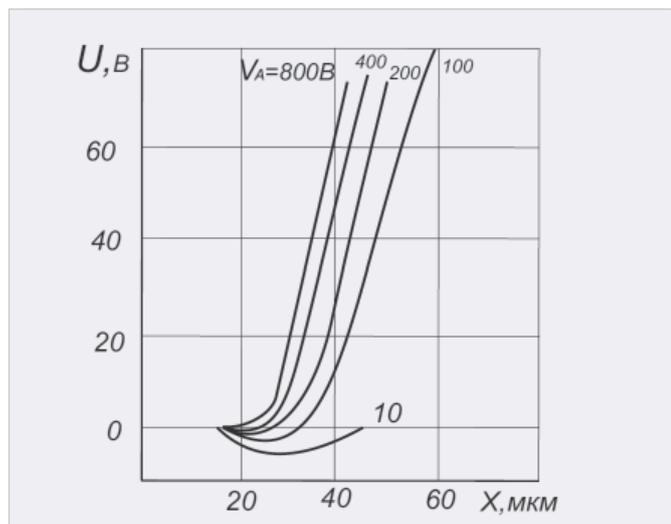


Рис. 3. Распределение потенциала по оси канала транзистора и тиристора со статической индукцией [9]

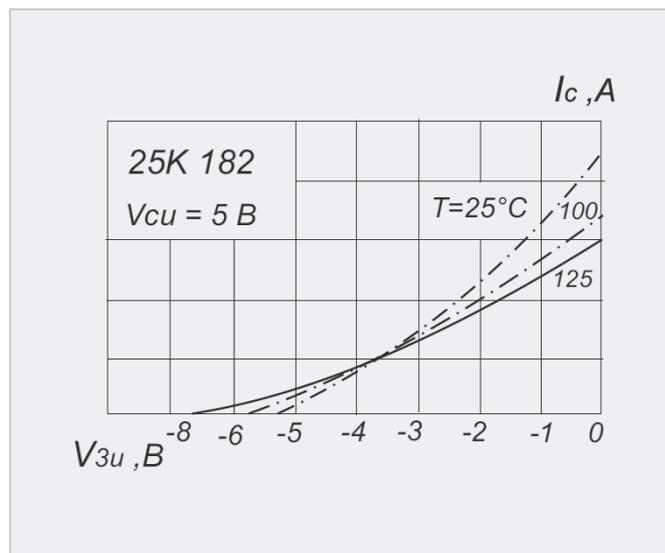


Рис. 4. Температурная зависимость тока стока СИТ [10]

типом носителей заряда. Это позволяет объяснить экспоненциальный участок на выходной и передаточной ВАХ в области малых токов, где значение высоты потенциального барьера велико. При уменьшении высоты барьера с ростом  $U_{зи}$  ток стока определяется главным образом сопротивлением канала. Поскольку  $R_{и} \cdot I_c \leq U_{зи}$ , и эффект модуляции ширины канала за счёт омического падения напряжения на его сопротивлении практически отсутствует, ВАХ приближается к линейной.

О температурной зависимости тока стока СИТ можно судить по передаточной характеристике прибора, приведённой на рис. 4 [10].

Температурный коэффициент тока стока в области малых токов является положительным, что хорошо коррелирует с представлениями о переносе заряда в данном режиме работы транзистора «горячими носителями заряда», преодолевающего потенциальный барьер в канале. В области больших значений тока стока температурный коэффициент меняет знак, что указывает на определяющее влияние на ток стока температурной зависимости проводимости канала [8]. Последнее обстоятельство обеспечивает, в частности, эффективную работу транзисторов при параллельном включении, что позволяет создавать мощные приборы со сложной ячеистой структурой.

Монополярный механизм переноса тока, отсутствие накопления заряда при работе во всём диапазоне токов [11] и высокая крутизна обеспечивают весьма высокие скорости переключения и рабочие частоты СИТ. Для ана-

лиза частотных свойств в литературе часто пользуются эквивалентной схемой замещения [12], которая приведена на рис. 5. Участок, окружённый прерывистой линией, представляет собой «внутренний» транзистор без учёта паразитных параметров корпуса.

Согласно эквивалентной схеме замещения (рис. 5) максимальная частота генерации определяется выражением [12]:

$$F_{\max} = \frac{g_m}{2\pi + (C_{зи} + C_{зс})}, \quad (10)$$

где  $C_{зи}$  – ёмкость затвор-исток;

$C_{зс}$  – ёмкость затвор-сток;

$g_m$  – крутизна характеристики внутреннего транзистора.

Согласно формуле (10) для повышения высокочастотных свойств необходимо увеличить крутизну характеристики и уменьшить ёмкости  $C_{зи}$  и  $C_{зс}$ . Авторы работы [12], рассматривая конструкцию транзистора с планарным затвором, считают, что «внутреннее» сопротивление затвора намного меньше внешнего, и не принимают его в рассмотрение. В конструкциях же со скрытым затвором оно имеет достаточно большую величину. С повышением частоты падение напряжения на нем растёт, напряжение, приложенное к управляющему р-п-переходу, уменьшается, и коэффициент усиления с ростом частоты падает.

Ухудшение частотных свойств с ростом  $R_з$  приводит, соответственно, к ухудшению временных характеристик переключения транзистора. Процесс выключения транзистора протекает следующим образом. При подаче на затвор импульса запирающего напряжения ОПЗ управляюще-

го р-п-перехода начинает расширяться с постоянной времени, определяемой произведением ёмкости затвора на его сопротивление. После смыкания ОПЗ в канале поток носителей заряда от истока к стоку прерывается и время задержки тока стока определяется в основном пролётным временем носителей заряда от потенциального барьера до стокового  $n^+$ -п-перехода.

Процесс включения транзистора состоит из тех же основных стадий, что и процесс выключения: перезарядки ёмкости управляющего р-п-перехода и пролёта носителей заряда от затвора к стоку.

В литературе до сих пор отсутствуют данные, которые позволяли бы проводить количественную оценку влияния электрофизических и конструктивных параметров приборов со статической индукцией на времена включения и выключения. Представленная в [12] эквивалентная схема замещения даёт только качественное представление этих связей.

Конструкция СИТ с планарным затвором, приведённая на рис. 6 [13–16], позволяет существенно уменьшить сопротивление затвора путём его металлизации и тем самым улучшить частотные свойства прибора, повысить однородность распределения тока в структуре при переключении, улучшить нагрузочную способность и надёжность.

Недостаток конструкций, представленных в [13–16], – невозможность создавать приборы на высокие рабочие напряжения с большими значениями коэффициента усиления по напряжению.

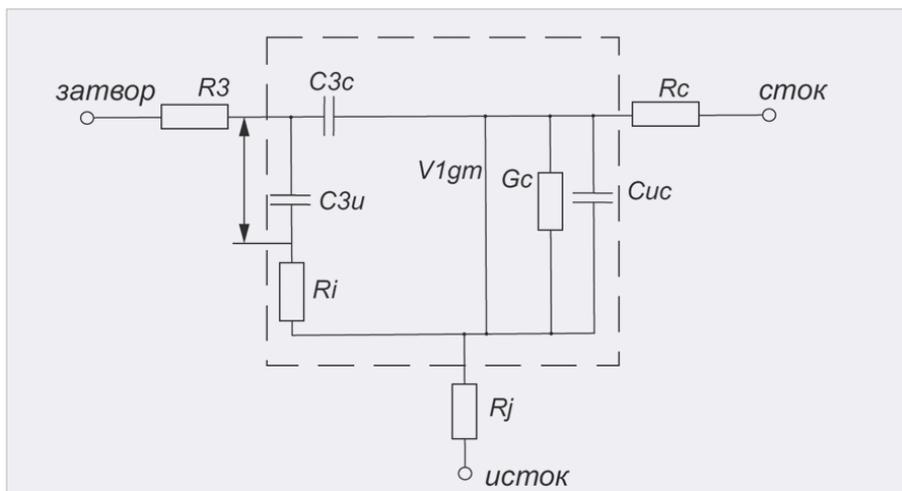


Рис. 5. Эквивалентная схема замещения транзистора со статической индукцией [12]

Первые серийные транзисторы, предназначенные для работы на высоких частотах, в основном выполнены с использованием планарной конструкции, приведённой на рис. 6. На её базе разработаны транзисторы MF-174, MF-175 с выходной мощностью 100 Вт на частотах 100 МГц и 1 ГГц [17–20].

Надо отметить, что известные серийные транзисторы с планарным затвором, обладающие высоким быстродействием, имеют невысокие рабочие напряжения (около 100 В) и большое сопротивление канала (5–10 Ом) [20], поэтому их использование в качестве мощных быстродействующих ключей неэффективно. Однако высокое быстродействие СИТ с планарным затвором, судя по [20], заставляет конструкторов и технологов вести поиск таких оптимальных форм областей затвора планарного типа и технологических приёмов их формирования, которые позволили бы исключить присутствующие данному варианту недостатки.

Интерес к данному конструктивному варианту усиливается ещё и тем обстоятельством, что СИТ в силу малого сопротивления в цепи затвора способен работать при прямом смещении управляющего р-n-перехода [21, 22]. При этом его выходное сопротивление уменьшается более чем на два порядка.

Первые разработки СИТ в России проводились в ОКБ при НЭВЗ одним из авторов данной работы. Были созданы транзисторы с рабочей частотой 1 ГГц и выходной мощностью 10 Вт. Поскольку одновременно на предприятии был разработан СВЧ биполярный транзистор (БТ) с рабочей частотой 2 ГГц, было принято решение проводить работы по созданию мощных

высоковольтных СИТ для усилителей мощности и ключевых схем.

Для создания СИТ с рабочим напряжением выше 100 В с планарным затвором была разработана новая технология формирования структуры кристалла [23], которая позволила создавать приборы с рабочим напряжением до 1500 В. Первым прибором, разработанным по данной технологии, был транзистор КП801 с рабочим напряжением 200 В и током 8 А [24] по заданию Бердского радиозавода для выходных каскадов усилителей мощности электропроигрывателей «Артур» и «Вега» [25]. Далее был разработан транзистор КП802 с рабочим напряжением 500 В и током 2,5 А для вторичных источников электропитания. В 1988 году был разработан транзистор КП926 с рабочим напряжением 450 В, током 16,5 А и сопротивлением в открытом состоянии 22 мОм [26], который был первым в мире высоковольтным транзистором, способным работать как в полевом, так и в биполярном режиме.

На рис. 7 представлен вид сверху кристалла транзистора КП926 и фрагмент его поперечного разреза.

Для более плотного заполнения площади кристалла истоком топология выполнена по принципу Oberlei (см. рис. 8).

Работает КП926 следующим образом. Для запираания транзистора на затвор подаётся отрицательное напряжение, и ОПЗ перекрывает канал. Для открывания и перевода транзистора в биполярный режим в затвор вкачивается ток. Дырки из р<sup>+</sup>-области затвора впрыскиваются в канал. Так как область n<sup>+</sup>-истока и р<sup>+</sup>-область затвора расположены очень близко друг к другу (около 1 мкм), прямо под областью исто-

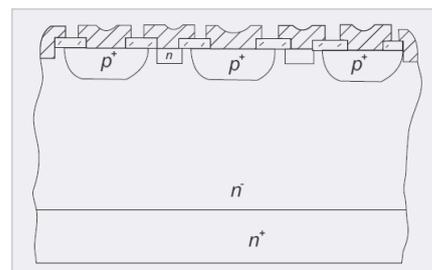


Рис. 6. Структура транзистора со статической индукцией с планарным затвором 8, 13

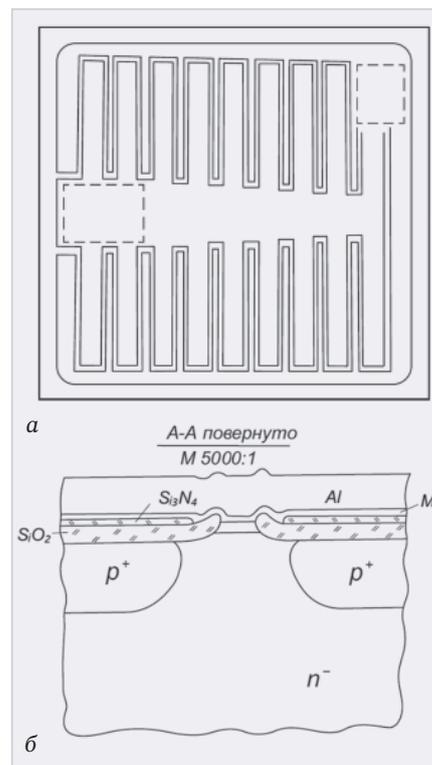


Рис. 7. Кристалл транзистора КП926: а) вид сверху; б) фрагмент поперечного разреза

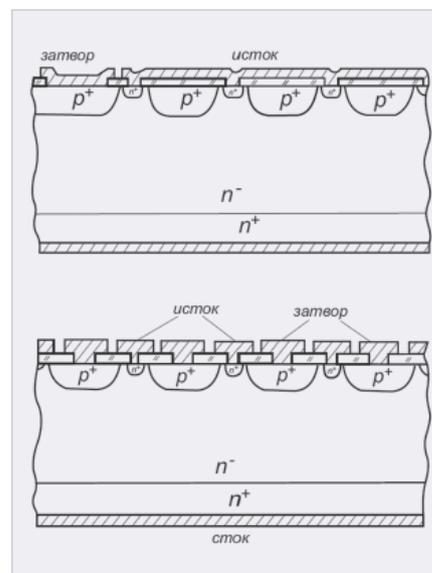


Рис. 8. Поперечный разрез кристалла КП926 с вариантом металлизации по принципу Oberlei

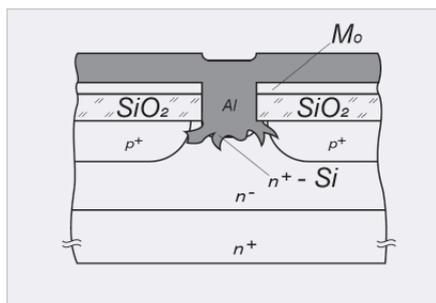


Рис. 9. Разрез кристалла с отсутствием Mo над областью истока из-за наличия дефекта в фотошаблоне после вжигания Al

ка формируется положительный заряд, который вытягивает электроны. Создаётся электроннодырочная плазма, которая модулирует  $n^-$ -область стока, и сопротивление этой области уменьшается более чем на три порядка – с 0,5 Ом в полевом режиме до 0,0001 Ом. Сопротивление транзистора по ТУ в биполярном режиме 22 мОм определяется металлизацией кристалла и корпусированием. Выключение транзистора происходит очень быстро – на затвор подаётся отрицательный импульс, и дырки из канала вытягиваются в затвор. Часть их рекомбинируют в канале с электронами.

На базе транзисторов КП926 разработчики вторичных источников питания (ВИП) создавали преобразователи, работающие на частоте 100 кГц. Многие из них предполагали (И.А. Криштафович, Институт электродинамики, г. Киев; Н.М. Тугов, МЭИ), что КП926 способен работать на частоте 1 МГц, но нет комплектующих (диодов, дросселей).

Для некоторых разработчиков ВИП транзистор КП926 вызывал неудобства из-за того, что он нормально открыт. В 1992 году был разработан аналог КП926 – транзистор КТ9154 с нормально закрытым каналом. Транзисторы с нормально закрытым каналом стали называть БСИТ. Далее была разработана серия СИТ и БСИТ с рабочими напряжениями от 150 до 1200 В (КП938, КП942 и т.д.).

Летом 1988 года НЭВЗ посетил изобретатель СИТ японский профессор Нишизава для знакомства с нашими разработками и производством СИТ. В разговоре с автором данной статьи Ю.Н. Максименко он отметил, что мы существенно опередили его, и ему нет смысла далее заниматься приборами со статической индукцией. Действительно, после 1988 года работы Нишизавы по этим приборам не появлялись.

Что же случилось с этими уникальными приборами далее? Почему их сегодня нет в России?

В 1992 году все новосибирские электронные предприятия (НЭВЗ, НЗПП и НЭВИ) объединили в НПО «Адрон», который возглавил С.И. Новотный. Руководство «Адрона» решило все усилия направить на выпуск схем памяти и закрыть направление силовой электроники. Руководство НЭВЗ (В.С. Медведко) передало серийно освоенные СИТ на Александровский полупроводниковый завод. Когда автор статьи приехал на завод по вопросам освоения, оказалось, что на заводе работает бывший наш технолог, которого в своё время уволили с НЭВЗ, а затем из ОКБ при НЭВЗ за плагиат и который вместе с руководством завода решил сам разрабатывать СИТ и БСИТ.

Таким образом, в 1992 году разработанные Ю.Н. Максименко и освоенные в серийном производстве приборы со статической индукцией перестали существовать.

Приборы, разработанные горе-технологом в Александрове, затем в Махачкале и ещё где-то, горели, как свечи [27]. Для увеличения процента выхода годных по кристаллу приборов он решил увеличить расстояние между затвором и истоком путём увеличения травления кремния и тем самым увеличил сопротивление затвора, что снизило на порядок быстродействие приборов, а также обусловило появление вторичного пробоя с повышением частоты преобразования в ВИП. Это привело к тому, что про СИТ забыли.

Справедливо будет заметить, что все разработанные СИТ и БСИТ имели существенный недостаток – высокую себестоимость из-за низкого процента выхода годных по кристаллу. Объяснить это можно следующим: все СИТ и БСИТ разрабатывались с использованием моей технологии формирования структуры кристалла [23], в которой, как потом выяснилось, были грубые ошибки.

С 1992 года автор статьи занимался разработкой принципиально новых приборов со статической индукцией – составных транзисторов СИТ-СИТ, СИТ с быстродействующим диодом, ключа с N-образной характеристикой, полностью защищённого ключа и т.д. По всем приборам были получены опытные образцы, которые проходили апробацию у разработчиков радиоэлектронной аппаратуры. В 1996 году

из-за развала ВПК направление микроэлектроники на НЭВЗ закрылось.

Только в 2020 году Ю.Н. Максименко вернулся к работам над приборами со статической индукцией. Проанализировав технологию формирования кристалла [23], автор статьи пришёл к выводу, что основная причина низкого процента выхода годных по кристаллу приборов – это дефектность фотошаблона для формирования окна к затвору по Mo. Из-за большой площади кристалла над областями истока попадал дефект фотолитографии, и молибден, который является барьерным слоем для Al, стравливался. Если над истоком нет Mo, то при вжигании Al происходят микрозакоротки истока с затвором (см. рис. 9). По ТУ норма на ток утечки между затвором и истоком при напряжении 25 В для транзистора КП926 установлена не более 1 мА. Если кристалл имел дефект, как показано на рис. 9, но утечка была меньше 1 мА, то он считался годным, хотя являлся потенциально ненадёжным.

Для устранения этого недостатка и ряда других была предложена новая технологическая схема формирования структуры кристалла, суть которой будет описана в отдельной работе.

На все новые приборы и технологические схемы поданы заявки на изобретения, а также написаны научные статьи [28–33]. На часть приборов уже получены положительные решения на изобретения [34–39].

В работе [31] представлена доработанная конструкция кристалла транзисторов КП926 и КТ9154, у которых эффективная ёмкость затвора уменьшена на порядок. Согласно уравнению (10) максимальная рабочая частота должна увеличиться на порядок, т.е. эти транзисторы будут способны работать на частотах до 10 МГц.

В работе [33] представлена новая конструкция кристалла транзисторов КП926 и КТ9154, у которых эффективная ёмкость затвора уменьшена ещё в три раза по сравнению с конструкцией, описанной в работе [31].

Конструкции, описанные в работах [31, 33], позволяют создавать высоковольтные ключевые приборы на Si с основными параметрами, значительно превосходящими ключевые приборы на SiC и GaN до максимальных рабочих напряжений 4–5 кВ [33].

Встает вопрос: а можно ли создавать СИТ на SiC и GaN и тем самым ещё улучшить параметры СИТ? Ответ – нет.

Таблица. Зависимость ОПЗ от приложенного к р-п-переходу обратного напряжения

Параметры, характеристики	Si	GaAs	SiC	GaN
Подвижность электронов, $\mu$ , $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	1450	9200...11 000	900	1000
Ширина ОПЗ Wp-n, мкм (при U = 200 В)	> 100	от 40	1,33...2,0	1,21...1,5
Относительная ёмкость р-п-перехода, С	0,1	1,0	> 30	> 30
Предельная частота переключения, МГц (при 600 В приборов)	> 10	-	0,15	2...5

В таблице приведена зависимость ОПЗ основных материалов, используемых в современной микроэлектронике, от приложенного к р-п-переходу обратного напряжения [40].

Из таблицы видно, что у материалов SiC и GaN зависимость ОПЗ от приложенного к р-п-переходу напряжения очень слабая. Создать СИТ с их использованием невозможно, но и при создании полевых MOSFET из-за этого возникают трудности – для управления транзистором необходимо высокое управляющее напряжение и тонкий подзатворный диэлектрик. Сегодня найдены решения по обходу этой проблемы, но за счёт усложнения технологии. Входная ёмкость

из-за тонкого диэлектрика высокая, и это ограничивает частотные свойства приборов.

Разработка приборов на Si по предложенным конструкциям позволяет создавать ключи с уникальными параметрами, которые значительно улучшат массогабариты и надёжность лётной электроники и электроники для электромобилей. Технология формирования кристаллов построена на хорошо освоенных в серийном производстве приёмах – Trench и Locos, поэтому себестоимость этих приборов должна быть низкой по сравнению с себестоимостью приборов на SiC и GaN.

Создание КП926 и КТ9154 с изотипным гетеропереходом [33] позволит

снизить сопротивление кристалла до 0,0005 мОм, что позволит уменьшить кристалл на 3-4 порядка. Но уменьшение кристалла приведёт к проблеме токоотвода. Возможно, нужно будет создавать конструкции с перевёрнутым монтажом кристалла.

Создание транзисторов на SiC и GaN с изотипными гетероисточками, которые модулировали бы низкоомную область стока, невозможно из-за конструктивных и электрофизических особенностей этих приборов.

## Заключение

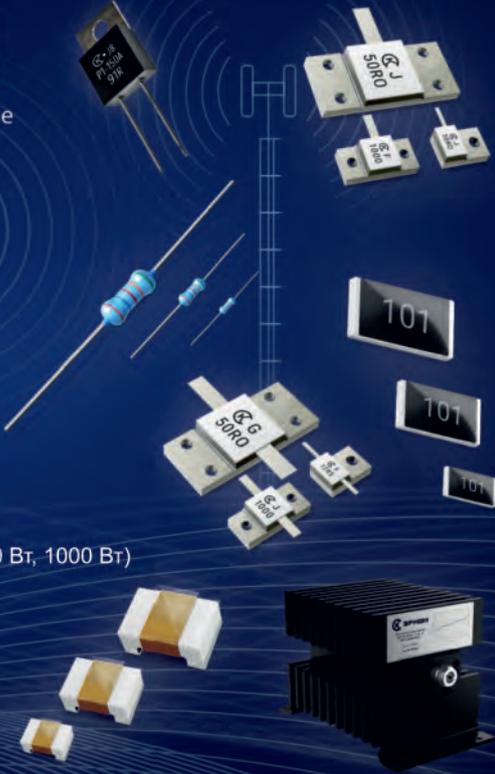
В данной работе рассмотрена история появления и развития нового класса приборов – приборов со статической индукцией. Их выходные характеристики триодного типа позволяют создавать мощные усилители НЧ с высоким качеством звучания, а способность работать как в полевом, так и в биполярном режимах – создавать идеальные ключи. Конструктивные особенности СИТ позволяют на их основе создавать принципиально новые приборы со статической индукцией: прибор с N-образной характеристикой (дефензор), СИТ с быстродействующей



# ЭРКОН

Акционерное общество

Научно-производственное объединение



**ПРОИЗВОДСТВО, РАЗРАБОТКА И ПОСТАВКА ПОСТОЯННЫХ РЕЗИСТОРОВ, АТТЕНУАТОРОВ И ЧИП-ИНДУКТИВНОСТЕЙ**

- Современная производственная база.
- Высокое качество.
- Индивидуальный подход к потребителю.

**НОВИНКИ**

Эквиваленты нагрузок ПР1-24 (50 Вт)  
 Аттенуаторы ПР1-25 (50 Вт, 100 Вт, 150 Вт, 250 Вт, 300 Вт, 500 Вт, 1000 Вт)  
 ТПИ - тепловые чип-перемычки  
 СВЧ-резисторы Р1-160 (до 40 ГГц)  
 Мощные СВЧ-резисторы Р1-170 (до 1000 Вт)

603104, Г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д. 6.  
 тел. : 8 (831) 202 - 24 - 34 (многоканальный)  
 8 (831) 202 - 25 - 52 (отдел продаж)  
 E-mail: info@erkon-nn.ru  
 www.erkon-nn.ru

Реклама

щим диодом, полностью самозащищённые приборы и т.д.

Создание приборов с высокими ключевыми характеристиками позволит превзойти по такому параметру, как кВт/л, лучшие зарубежные аналоги в преобразовательной технике, что очень важно для лётной отрасли. Не менее важно это и для электромобильной отрасли. Повышение эффективности ключа повысит пробег электромобилей на одной зарядке.

Сегодня ведущие фирмы России, разрабатывающие силовые приборы, такие как «Ангстрем», «Микрон» и др., знают о работах Ю.Н. Максименко, но по ряду объективно-субъективных причин стараются их не замечать и упорно продолжают работать над улучшением конструкций IGBT и MOSFET.

Работа написана с целью привлечь внимание людей, которые могут решить вопрос о начале разработок предлагаемых автором статьи приборов.

## Литература

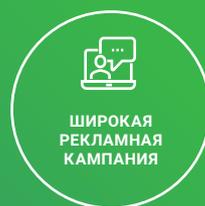
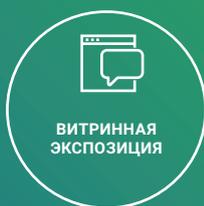
- Unipolar Field – Effect Transistor // Proc. IEEE. 1952. Vol. 40. № 11. P. 1375–1376.
- Zuleeg R. Asilicon space-charge-limited triode and analog transistor // Solid-State Electronics. 1967. Vol. 10. № 5. P. 449–460.
- Teszner S., Gicquel R. Gridistor – A new fieldeffect device // Proc. IEEE. 1964. Vol. 52. № 2. P. 1502–1513.
- Shumka A. A Germanium Solid-State Triode // I. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. № 1. P. 438–439.
- Nishizawa I., Terasaki T., Shibata I. Field-Effect Transistor Versus Analog Transistor (Static Induction Transistor) // IEEE Trans, on Electron Dev. 1975. Vol. 22. № 4. P. 185–197.
- Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов / пер. с англ. под ред. А.Ф. Трутко. М.: Энергия, 1975.
- Транзистор, управляемый полем: патент 52-6076 Япония: МКИ НОИ 29/80 / Nishizawa I. № 46-28405; заявл. 28.04.71; опубл. 18.11.77.
- Nishizawa I., Yamamoto K. High-Frequency High-Power Static Induction Transistor // IEEE Trails, on Electron Dev. 1978. Vol. 25. № 3. P. 314–322.
- Homola I., Milnest A.G. Turn-off-type Field-Controlled Thyristor. Concepts for High Power Operation // Solid-State Electronics. 1980. Vol. 23. № 11. P. 1101–1105.
- Мощные транзисторы со статической индукцией / М. Татта и др. // Тохоку Киндзоку Гихо. 1980. Т. 8. № 1. С. 45–52.
- Юкимото Д. Транзисторы со статической индукцией с присоединённым затвором // Дэнки Дзайре. 1981. Т. 20. № 9. С. 29–34.
- Сихира К. СВЧ-транзисторы со статической индукцией // Хандотай Кэмкюсе Хококу. 1980. Т. 16. № 1. С. 21–27.
- Normally-off type high speed SI-thiristor / Y. Nakamura, H. Tadano, S. Sagiya at al. // International Electron Devices Meet. Sun-Fransisco, Calif. 1982. P. 480–483.
- Ozawa O., Iwasaki H. A Vertical FET with Self-Aligned Ion-Implanted. Source and Gate Regions // Manuscript received Ianury 27, 1977. Revised August 29, 1977. P. 56–57.
- International Electron Devices Meet / A. Cogan, R. Regan, I. Bencuye at al. Washington, 1983. P. 221–224.
- Полевой транзистор с продольным управляющим р-п-переходом: патент 52-3791 Япония: МКИ НОИ 29/80 / Акиясу И. (Япония); Сони К.К. (Япония). № 48-115121; заявл. 13.10.73; опубл. 29.01.77.
- Способ изготовления полевого транзистора с продольным расположением областей. Заявка 58-28782 Япония: МКИ НОИ 29/80/ Сони К. К. № 50-38313; заявл. 28.03.75; опубл. 17.06. 83.
- Shino T., Kamo H., Aoki M. 2 GHz high power silicon SIIs // Proc. 1979 Int. Conf. Solid State Devices (Tokyo) Iap, I. Appl. Phys. Suppb. 1980. Vol. 19. P. 283–287.
- 1 GHz 100 W internally matched Static indution transistor / M. Aiga, Y. Higashi, M. Kato, Y. Kajiwara et al. // Proc. 1979 European Microwave Conf. 1979. P. 561–565.
- Microwaves. 1979. № 11. P. 20.
- Nishizawa I., Ohmi T., Chen H. Analysis of Static Characteristic of a Bipolar-Mode SIT (BSIT) // IEEE Trans, Electron Dev. 1982. Vol. ED-29. № 8. P. 1233–1244.
- Tamama T., Murase K., Mizushima Y. Voltage-Controlled negative resistance in A submicron Vertical IFET // Solid-State Electronics. 1984. Vol. 27. № 10. P. 855–866.
- Способ изготовления полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом и вертикальным каналом: авт. свидетельство 1215546 СССР: МКИ НОИ 21/18 / Максименко Ю.Н., Корнилова С.Н., Жуковский Н.М. (СССР). № 3052227; заявл. 22.06.82; зарег. в Госреестре изобр. СССР 01.11.85.
- Антонов М.И., Данилов В.С., Максимеко Ю.Н. и др. Мощные полевые транзисторы КП801В, Г, Д с выходными характеристиками триодного типа // Электронная промышленность. 1985. № 7. С. 42–44.
- Усилитель мощности: авт. свидетельство 1270874 СССР: МКИ НОЗ 3/26 / Бессонов Г.К., Семенов Ю.Е., Максименко Ю.Н., Воронцов А.А. (СССР). № 3343424; заявл. 11.01.85; зарег. в Госреестре изобр. СССР 15.07.86.
- Максименко Ю.Н. Мощный транзистор со статической индукцией КП926А, Б // Современная электроника. 2023. № 3.
- Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. М.: Додэка – XXI, 2001. 384 с.
- Максименко Ю.Н. Мощный высоковольтный транзистор со статической индукцией с антипараллельным диодом // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2022. Вып. 3 (266).
- Максименко Ю.Н. Мощный полупроводниковый прибор с N-образной вольт-амперной характеристикой // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2022. Вып. 4 (267).
- Максименко Ю.Н. Мощный высоковольтный составной транзистор со статической индукцией // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2022. Вып. 4 (267).
- Максименко Ю.Н. Транзистор со статической индукцией КП926 с повышенным быстродействием // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2022. Вып. 3 (266).
- Максименко Ю.Н., Грабижева В.К. Полностью защищённый транзистор со статической индукцией // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2023. Вып. 1 (268).
- Максименко Ю.Н., Грабижева В.К. Можно ли сделать идеальный полупроводниковый ключ? // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2023. Вып. 1 (268).
- Составной высоковольтный переключающий транзистор: заявка на изобретение от 29.01.86 № 4034830/25 / Максименко Ю.Н., Данилов В.С., Корнилова С.Н., Сергеев А.Г. Решение о выдаче авт. свидетельства от 30.12.86.
- Составной транзистор: авт. свидетельство от 15.09.1989 № 1538831 / Максименко Ю.Н., Криштафович И.А., Фелькер Г.А.
- Составной высоковольтный переключающий транзистор: авт. свидетельство от 22.12.1989 № 1559990 / Максименко Ю.Н., Данилов В.С., Бессонов Г.К.
- Мощный высоковольтный составной транзистор: авт. свидетельство от 15.08.1990 № 1614715 / Максименко Ю.Н., Макаров В.А., Агафонов С.М.
- Составной транзистор со статической индукцией: авт. свидетельство от 22.08.1990 № 1616449 / Максименко Ю.Н., Макаров В.А., Фелькер Г.А., Пальмихин М.Б.
- Дефензор: заявка на патент от 05.05.2022 № 2022112569/289026205 / Максименко Ю.Н., Глухов А.В., Романюк А.И. Решение о выдаче патента от 10.11.2022.
- Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. Si, GaAs, SiC, GaN // Силовая электроника. 2010. № 5.



# ELECTRONICA ПРЕМИЯ

ПРЕМИЯ ELECTRONICA - НЕЗАВИСИМОЕ ЕЖЕГОДНОЕ МЕРОПРИЯТИЕ, НАПРАВЛЕННОЕ НА ПОДДЕРЖКУ И ПРОДВИЖЕНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ РОССИЙСКИХ КОМПАНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

## ПРЕИМУЩЕСТВА УЧАСТИЯ



## ВЫБЕРИТЕ КАТЕГОРИЮ И НОМИНАЦИИ ДЛЯ УЧАСТИЯ

### МИКРО- ЭЛЕКТРОНИКА

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ ДИЗАЙН-ЦЕНТРОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

### ТЕХНОЛОГИИ для КИИ

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗРАБОТКУ И ВНЕДРЕНИЕ ДОВЕРЕННЫХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ ПЛАТФОРМ
- ЗА РАЗРАБОТКУ И ПРОИЗВОДСТВО СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ
- ЗА РАЗРАБОТКУ И ПРОИЗВОДСТВО СРЕДСТВ БЕЗОПАСНОСТИ КИИ
- ЗА ВКЛАД В РЕАЛИЗАЦИЮ ПРОГРАММЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ РОССИИ

### ДИСТРИБУЦИЯ

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ КАНАЛОВ ПОСТАВОК ЭКБ
- ЗА СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ КАНАЛОВ ПОСТАВОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
- ЗА СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ КАНАЛОВ ПОСТАВОК СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ И СИСТЕМ

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ АУТСОРСИНГ

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗВИТИЕ КОНТРАКТНОЙ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ КОНТРАКТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗРАБОТКУ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КООПЕРАЦИИ

### ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗВИТИЕ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, СРЕДСТВ ПРОИЗВОДСТВА И МАТЕРИАЛОВ
- ЗА РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ

### РОБОТОТЕХНИКА

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗРАБОТКУ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
- ЗА РАЗРАБОТКУ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ В ОБЛАСТИ РОБОТОТЕХНИКИ И СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
- ЗА ВНЕДРЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И КОМПЛЕКСОВ

### ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА РАЗРАБОТКУ И ПРОИЗВОДСТВО ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭКБ
- ЗА РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА РАЗВИТИЕ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ
- ЗА СОЗДАНИЕ САПР И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ

### ПОДГОТОВКА КАДРОВ для ОТРАСЛИ

#### НОМИНАЦИИ:

- ЗА ПОДГОТОВКУ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ
- ЗА РАЗВИТИЕ НОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ И ИНИЦИАТИВ В РАДИО-ЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ
- ЗА ВНЕДРЕНИЕ УНИКАЛЬНЫХ КАДРОВЫХ ПРОГРАММ НА СВОЕМ ПРЕДПРИЯТИИ
- ЗА СОЗДАНИЕ КАДРОВОГО РЕЗЕРВА ОТРАСЛИ В РАМКАХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ

### ЛОКАЛИЗАЦИЯ

#### НОМИНАЦИЯ:

- ЗА РАЗВИТИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

В РАМКАХ



25-Я ЮБИЛЕЙНАЯ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ВЫСТАВКА  
ЭЛЕКТРОНИКИ

11–13 АПРЕЛЯ 2023  
МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО

## ПОДАЙТЕ ЗАЯВКУ

ОНЛАЙН НА  
[EXPOELECTRONICA.RU](http://EXPOELECTRONICA.RU)



ОРГАНИЗАТОР  
ORGANISER

Реклама

# Инерциальные модули ГКВ в системе наведения антенн SOTM

Александр Бекмачев (bae@favorit-ec.ru), Андрей Михеев (am@mp-lab.ru), Александр Галкин (alexgalkin.jr@gmail.com)

Компания Лаборатория Микроприборов – ООО ЛМП не только производит блоки инерциально-спутниковой навигации, но и занимается их адаптацией и внедрением в клиентские проекты. В этой статье приводится теория и описывается практика использования модулей серии ГКВ в системах управления мобильными антеннами спутниковой связи SOTM.

Необходимость быть на связи и привычка обмениваться значительными потоками данных стала для многих наших современников обыденностью. Фраза «я в метро, сейчас связь пропадёт» уходит в прошлое, даже в высокоскоростном поезде доступ в Интернет перестал быть привилегией пассажиров бизнес-класса – базовые станции сотовой связи, установленные вблизи железнодорожных путей, позволяют оставаться онлайн. Другая картина на открытых водных пространствах, в горах, в тайге, в воздухе – за пределами зоны покрытия стационарных точек доступа к каналам обмена данными и голосовой связи. Здесь связь с подвижным объектом обеспечивают спутниковые антенны дуплексного канала связи в Ku/Ka-диапазоне, осуществляющие приём и передачу данных через геостационарные искусственные спутники Земли. Именно благодаря такой антенне можно подключиться к Wi-Fi на борту самолета и

оставаться в глобальной сети во время полёта на высоте 10 000 метров.

Стремительно растёт спрос на наличие связи в любом месте и в любое время как необходимое условие для работы коммерческих мультимедийных систем, для обработки данных дистанционного зондирования наземной инфраструктуры, а также для работы средств связи, наблюдения и разведки. Потребность в поддержании постоянной мобильной связи независимо от местонахождения обусловила значительный рост предложений продукции и услуг с использованием спутниковой связи – SATCOM и особенно используемых в ней мобильных устройств – SATCOM on-the-move, или кратко – SOTM.

Спутниковая связь подразумевает использование сети геостационарных спутников для передачи сигнала радиосвязи между передатчиком и приёмником, расположенными в двух разных точках Земли. Ключевой задачей любой системы спутниковой связи является

поддержание соединения по линии прямой видимости с целевым спутником. К счастью, отслеживать его необходимости нет, поскольку его орбита синхронизирована с вращением Земли, тем самым фиксируя его положение в небе. В связи с этим от терминала спутниковой связи требуется высокая точность наведения для отправки и приёма большого объёма данных и предотвращения помех на соседних спутниках, поскольку спутники на геостационарной орбите размещены очень плотно, в нескольких градусах друг от друга. Фактически, для того чтобы максимально увеличить мощность передачи антенны и остаться в рамках нормативных требований, предъявляемых к наземным станциям, установленным на транспортных средствах, погрешность наведения антенны должна быть менее  $0,2^\circ$  ( $3\sigma$ ), как показано на рис. 1.

Мобильные терминалы спутниковой системы связи для средств наземного транспорта обычно оснащены спутниковой антенной, установленной на перемещаемом в вертикальном и горизонтальном направлении подвесе, поворачивающем и наклоняющем антенну для правильной ориентации. Для определения вектора наведения терминалу требуются данные, получаемые от приёмника глобальной навигационной спутниковой системы



Рис. 1. Схема взаимодействия подвижного терминала с геостационарной спутниковой группировкой

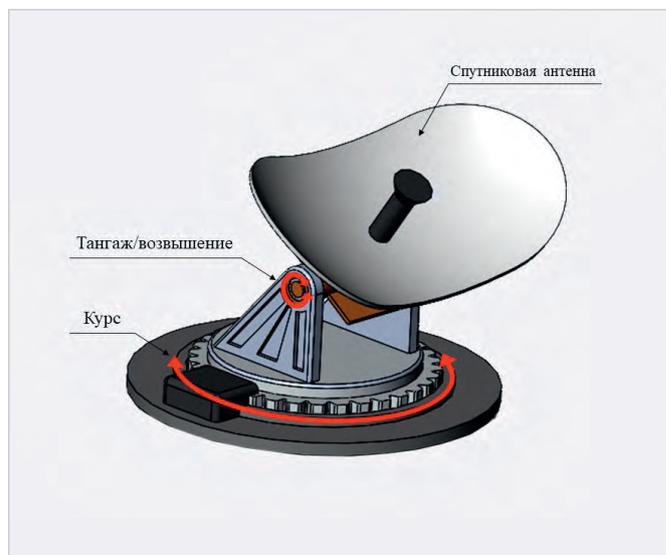


Рис. 2. Степени свободы антенны SOTM

(ГНСС) ГЛОНАСС/GPS/Beidou, – координаты и скорость транспортного средства, а также от инерциального модуля – ориентация подвеса. С помощью полученных из всех этих источников данных система управления терминала (СУТ) может определить необходимый вектор наведения и задать спутниковой антенне системы требуемую направленность (рис. 2, 3).

Характеристики инерциального модуля выбираются исходя из особенностей режимов работы и динамики объекта, на котором установлена антенна SOTM. При этом модуль инерциальной навигационной системы (ИНС) часто оснащается встроенным приёмником сигналов ГНСС, который может использовать для приёма сигналов спутниковой навигации как одну, так и две антенны (рис. 4, 5).

Системы спутниковой связи в основном используются на крупных морских и воздушных объектах с малой динамикой движения. Практика показала, что динамика подобных судов недостаточна для коррекции курсовой составляющей системами с одноантенными приёмниками ГНСС. При работе в условной статике или при длительном прямолинейном движении лучшим решением является использование двухантенных систем, поскольку в этой конфигурации появляется техническая возможность указания курса от мастер-ровер приёмника. Для более маневренных объектов – маломерных судов, наземного транспорта и т.п. – вполне подходит использование одноантенных инерциально-спутниковых навигационных систем.

В практике построения СУТ применяются описанные далее подходы к размещению датчиков положения и приёмников/антенн ГНСС. Основные отличия вариантов 1, 2 и 3 состоят в месте установки модуля ИНС на опорно-поворотном устройстве (ОПУ) терминала спутниковой связи с антенной SOTM.

**Вариант 1.** ИНС размещена только на внутренней оси (рис. 6).

Это самый простой для системы управления способ, он обеспечивает прямое измерение наведения антенны, а также обратную связь для её стабилизации, но имеет ограничение из-за способа установки.

**Вариант 2.** ИНС установлена на основании подвеса или на азимутальной оси вращения и дополнен датчиками обратной связи с обеих осей – вращающимися энкодерами (рис. 7).

Наиболее частая схема в приложениях мобильных средств спутниковой

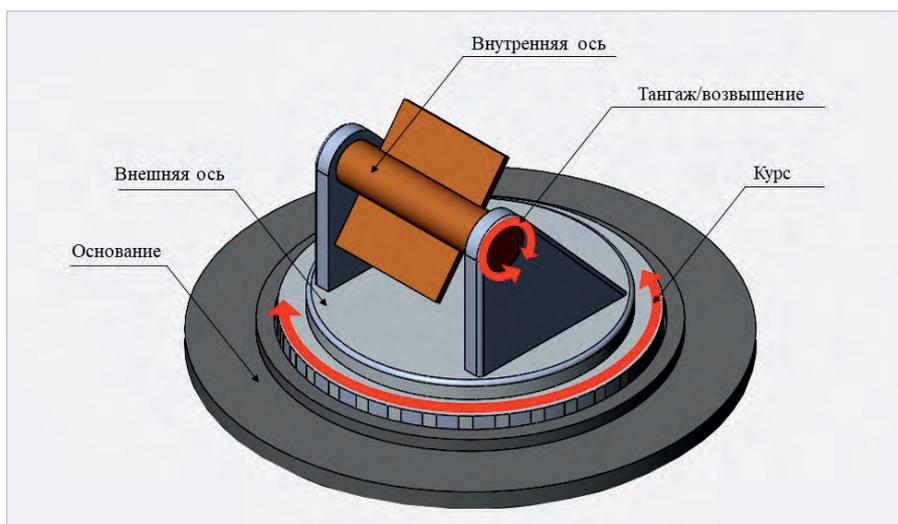


Рис. 3. Упрощённая схема опорно-поворотного устройства (ОПУ)



Рис. 4. Одноантенные инерциальные навигационные модули со встроенным приёмником ГНСС: а) ГКВ-11; б) ГКВ-6



Рис. 5. Двухантенные инерциальные навигационные модули со встроенным приёмником ГНСС: а) ГКВ-12; б) ГКВ-7

связи – установка в основании подвеса модулей ИНС и приёмников ГНСС. Приёмники могут быть как встроенными в ИНС, так и самостоятельными узлами. Системы ИНС+ГНСС обеспечивают положение и ориентацию основания в абсолютной системе координат, а датчики обратной связи обеспечивают взаимную ориентацию между основанием и внутренней осью. ГНСС-приёмник или ГНСС-антенна могут находиться и снаружи антенны, и внутри неё.

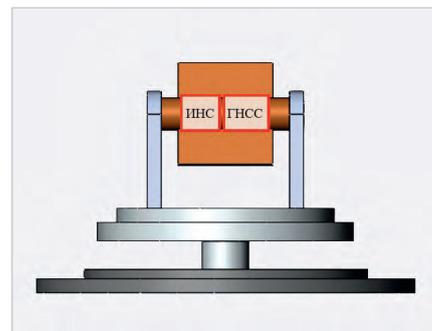


Рис. 6. Размещение ИНС+ГНСС на внутренней оси (на тарелке) SOTM

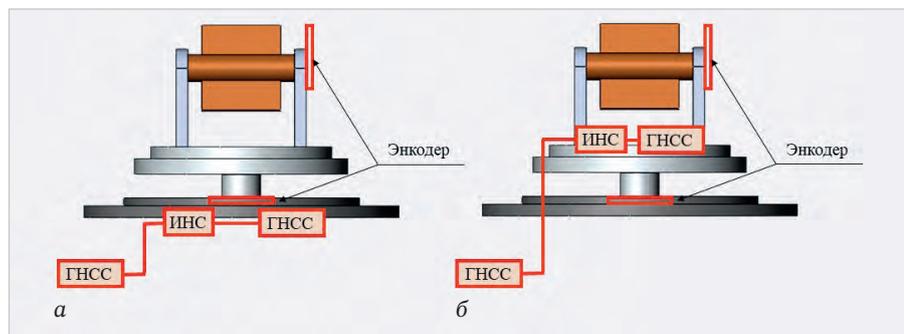


Рис. 7. Размещение ИНС+ГНСС в терминале SOTM по варианту 2: а) на основании опоры/подвеса; б) на азимутальной оси

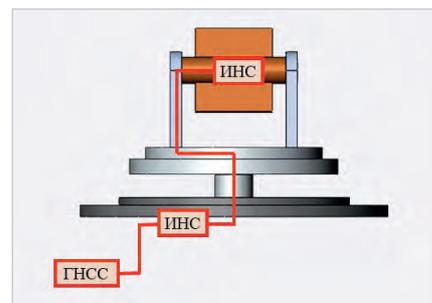


Рис. 8. Вариант СУТ SOTM с двумя модулями ИНС+ГНСС, один из которых не имеет встроенного приёмника ГНСС

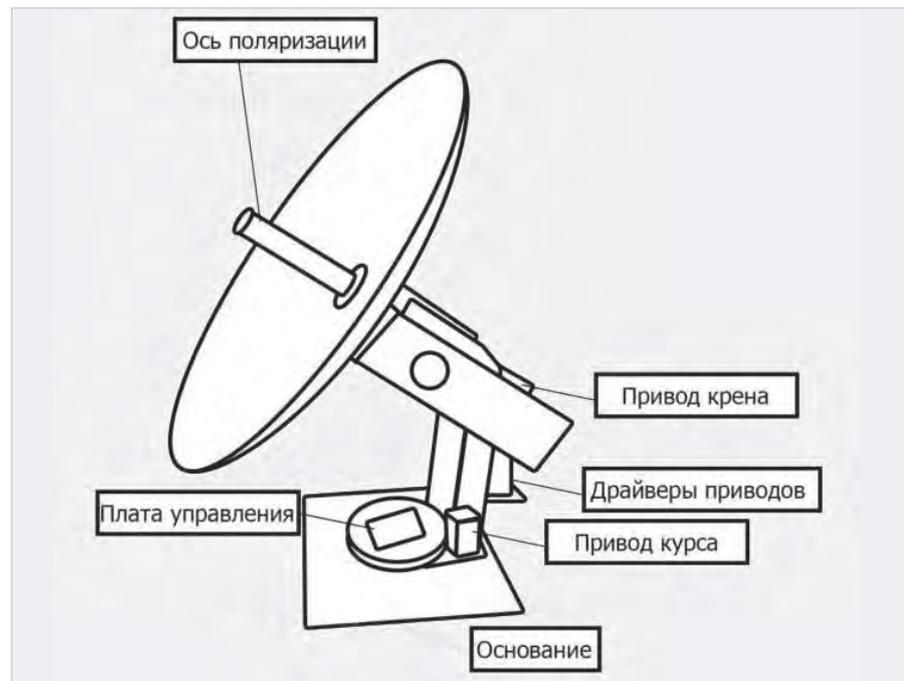


Рис. 9. Схема четырёхосной морской антенны

**Вариант 3.** Применено два модуля ИНС, один из них – на основании, другой – на тарелке антенны (рис. 8).

Такая компоновка сочетает в себе преимущества вариантов № 1 и № 2 и позволяет обойти проблемы сложной установки и отказаться от использования энкодеров в осях свободы, что положительно скажется на отказоустойчивости системы в целом.

Разработчику СУТ необходимо позаботиться о компенсации суммарной погрешности, которая результирует влияние следующих факторов.

1. Несоосность установки ИНС на ОПУ, которая должна быть учтена при производстве. Обычно компенсируется индивидуальной калибровкой каждой антенны.
2. Собственная погрешность встроенных энкодеров и ошибка неортогональности осей ОПУ, это явление свойственно конфигурации системы по варианту 1.

3. Недостовверная информация, поступающая от приёмника ГНСС. Источником ошибок в потоках данных ГНСС могут быть сцинтилляция радиосигналов из-за ионосферных мерцаний, ослабления и искажения сигналов в силу природных и техногенных причин в нижних слоях атмосферы и в приземном слое, а также преднамеренное подавление – jamming и подмена – spoofing. Основной метод компенсации таких ошибок – программный анализ, фильтрация и программная коррекция в корреляции с данными ИНС и с учётом мощности принимаемого сигнала ГНСС.

4. Временная задержка. Минимальное время между измерением навигационных параметров и передачей их в систему управления приводами существенно влияет на точность наведения спутниковой антенны.
5. Погрешность управления. Для приложений слежения за целью с датчиком,

имеющим малый радиус обзора, слежение за перемещением цели требует как точного определения местоположения, так и точного управления.

Специалисты Лаборатории Микроприборов систематически ведут НИР с целью улучшения потребительских свойств своей продукции. Результаты анализа особенностей различных кинематических схем СУТ, понимание источников системных и случайных ошибок в «сырых» данных и в алгоритмах системы управления позволяет постоянно совершенствовать конструкцию и ПО собственных ИНС. Одним из таких достижений стало введение процедуры начальной выставки модулей ГНСС. В результате клиенты получили возможность проводить начальную выставку не только в статике, но и в движении, что значительно сокращает время до получения надёжного навигационного решения вне зависимости от стихии, в которой движется объект: по суше, воде или в воздухе.

Расскажем подробнее о разработке алгоритма наведения спутниковых антенн, установленных на подвижных носителях [1].

Рассматриваемый алгоритм подразумевает работу в двух системах координат – системе координат инерциального модуля и системе координат энкодеров антенны. Вычислив свою ориентацию на базе инерциальных сенсоров, а также собрав данные о текущем положении энкодеров антенны и о положении спутника на небосклоне, модуль вычисляет требуемое положение энкодеров антенны для наведения на спутник. По уровню сигнала спутника в процессе стабилизации антенн производится коррекция дрейфа нуля инерциального модуля в процессе работы. Данное решение позволяет упростить процесс разработки ПО для систем стабилизации, поскольку инерциальный модуль уже даёт требуемые углы осей антенны и освобождает вычислитель антенны от перевода

систем координат и решения проблемы ухода нуля инерциального модуля.

Отладка и тестирование производились на двух мобильных спутниковых антеннах различных типов: на четырёхосной корабельной антенне, а также на двухосной антенной решетке, предназначенной для установки на наземных мобильных носителях. Антенны для проведения работ были предоставлены ООО «Технологии Радиосвязи» (рис. 9).

Для каждой из антенн была разработана программа управления, предусматривающая работу в следующих режимах:

- ожидание команды начала работы с пульта управления;
- поиск концевых датчиков по каждой из осей;
- установка осей в условное нулевое положение, для осей крена и угла места – горизонтальное;
- сброс инерциального модуля и ожидание его инициализации;
- непосредственное управление положением осей антенны;
- наведение по заданному азимуту и углу места в режиме стабилизации;
- автоматический поиск и удержание спутника на заданном возвышении или по его долготе;

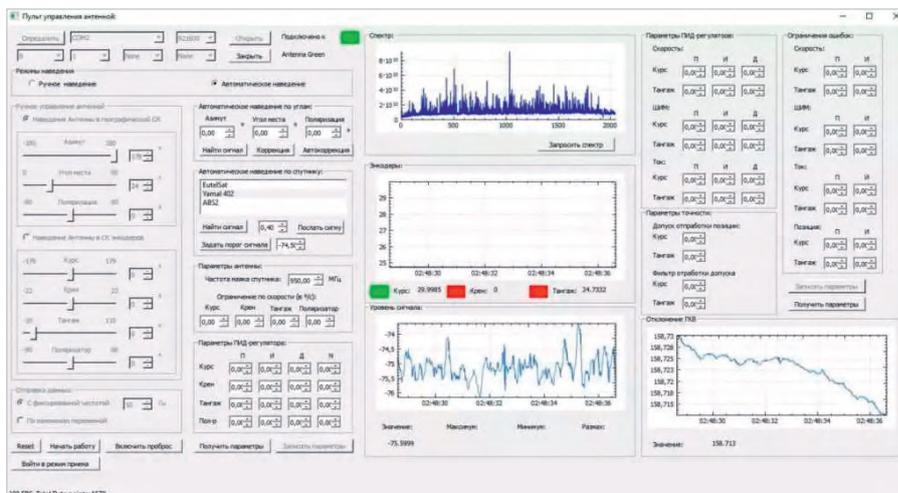


Рис. 10. Экран ПО «Пульт управления наведением»

- аварийный режим;
- режим сброса.

Для удобства управления каждой из этих систем был разработан программный пульт управления антенной для ПК. Пульт предусматривал управление антенной в каждом из режимов, настройку параметров маяка спутника и ПИД-регуляторов приводов осей, а также вывод текущего состояния антенны в виде графиков (рис. 10).

В ходе итоговой верификации обновлённого ПО на основе полученных опытных данных было проведено тестирование инерциальной системы при качке. Система наведения прошла испытания в двух видах:

- водные испытания на мобильном носителе – катере;
- наземные испытания на мобильном носителе – автомобиле.

Целью испытаний была проверка работы механизма инициализации

# МЫ РАСТИМ БУДУЩЕЕ...

ИДМ

АРБЕЛОС

ИНТЕГРАЛ

НИКАРО ЭЛЕКТРОНИКИ

МИПАНДР

АУСЛУШЕУ

ampl

АЕДОН

KV системы

TDK-Lambda

TESLA ELECTRIC

Great River Technology

ChipSTAR

ДОГПРОЕКТНИКА

Microsemi

Maxwell

TRIVAL antenne

АМИТРОН

GOVA 高华科技

GSS

CYPRESS

CRANE INTERPOINT

ЭЛЕКТРОДЕТАЛЬ

SAFRAN Colibrys

sensoror

IOR HiRel

ana digm

ПАО «ЗАВОД АТАЛАНТ»

CvILux Group

SGX SENSORTECH

Wolfspeed

К-Т-Р

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО ЭЛЕКТРОСОЕДИНИТЕЛЬ

septentrio

Лаборатория Микроприборов

СНЕЖЕТЬ

MATSUO

## ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ПРИЕМНИКИ ГНСС

# ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Актуальный склад -  
смотрите онлайн

Реклама

Россия, 105318, Москва, Семеновская площадь, д.7, e-mail: info@favorit-ec.ru, тел/факс: +7(495) 627 76 24, www.favorit-ec.ru



Рис. 11. Антенна на катере

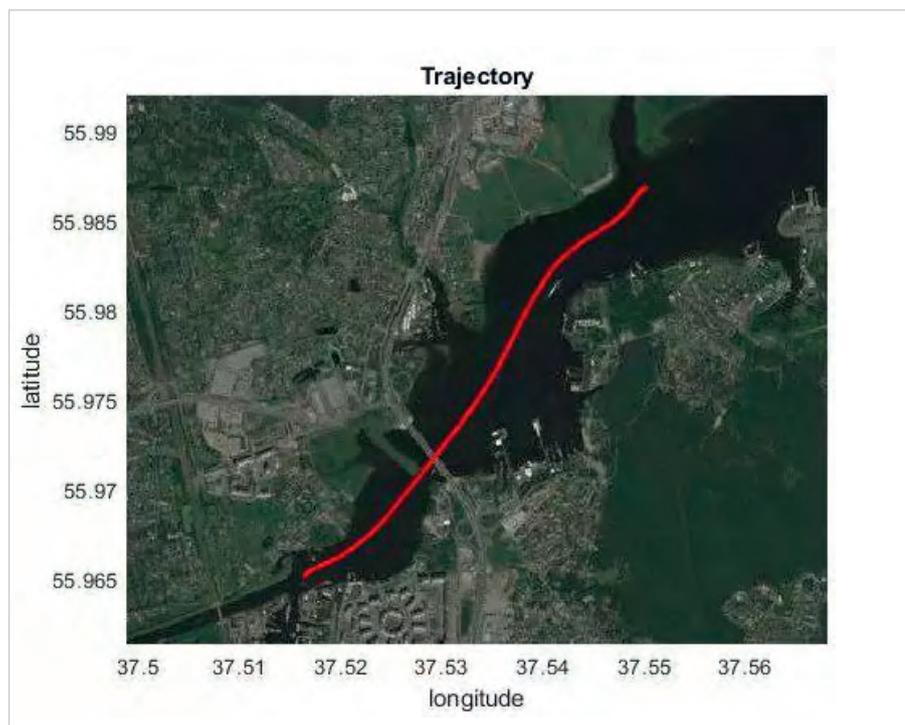


Рис. 12. Место испытаний и трек теста на воде при скорости 50 км/ч (данные GPS)

инерциальной системы в условиях морской качки и наземного движения, а также проверка работы механизма коррекции системы координат инерциальной системы по данным об уровне сигнала транспондера спутника.

В мобильных испытаниях использовалась более удобная в транспортировке антенная система SOTM.

Для проверки наведения использовался спутник Yamal 402, частота используемого транспондера 12 521,9 МГц.

При всех испытаниях алгоритм работы системы наведения был следующим:

- инициализация осей антенны и ожидание инициализации ГКВ-11;

- поиск сигнала транспондера выбранного спутника в диапазоне азимута  $\pm 180^\circ$ ;
- переход ГКВ-11 в связанную с севером систему координат после нахождения сигнала;
- удержание сигнала транспондера спутника с коррекцией при понижении уровня сигнала.

### Водные испытания. Стабилизация и наведение антенны

Для проверки работы навигационного алгоритма на воде проведены испытания на катере, с разной скоростью движения: 10, 20, 50 км/ч и сложными

траекториями движения – круги, «восьмерки», проезды под мостами (рис.11, 12). Каждое испытание имело стадии: инициализация, выставка ИНС, поиск спутника, переход в навигационный режим и удержание спутника антенной. Коррекция навигационных вычисления модуля ГКВ осуществлялась по данным от ГНСС приемника и по сигналу уровня мощности трансивера.

Трансивер антенны фиксирует мощность сигнала от спутника, падение сигнала должно быть не более 3 дБ. Система отработала штатно на всех скоростях, при поворотах наблюдалось просаживание мощности сигнала, это связано с несоосностью базиса ГКВ и ОПУ на  $0,7^\circ$ , которая была вычислена после испытаний.

Из-за несоосности навигационный фильтр больше учитывал коррекцию от ГНСС приемника и наблюдалось ослабление сигнала, при увеличении доверия к коррекции по сигналу трансивера, направление на спутник удалось удерживать, в том числе на поворотах. По итогам испытаний было решено сузить доверительный интервал по сигналу трансивера, а также выработать методику приведения осей ГКВ к осям ОПУ.

### Наземные испытания. Коррекция ориентации

Проведены испытания на автомобиле в городских условиях и на пересеченной местности, спутниковая антенна установлена на крышу. Включение и наведение на спутник осуществлялось из состояния покоя и в движении.

В городских условиях сигнал от спутника терялся при затенении домами или при проездах под мостами и в 12 из 12 случаев восстанавливался до уровня не менее  $-3$  дБ. Автомобиль двигался с разными скоростями: 10, 20, 50 км/ч, ускорениями и траекториями (рис. 13, 14). Как и на воде, наиболее сложной траекторией было круговое движение, но после увеличения доверия к сигналу трансивера ослабление приемного сигнала было в допуске.

Анализ полученных данных показал, что при движении на скоростях более 50 км/ч и поворотах не успевают отрабатывать приводы ОПУ.

В результате проведенной работы разработано программное решение задачи наведения мобильных спутниковых антенн, интегрированное в систему алгоритмов ИНС.

Данное решение способно функционировать, как в условиях коррекции по ГНСС, так и в автономном режиме, осу-



Рис. 13. Антенна SOTM, установленная на крыше автомобиля

ществляя коррекцию курса по мощности принимаемого трансивером сигнала.

Описанные выше мероприятия – это только часть работы, проводимой Лабораторией Микроприборов с целью совершенствования аппаратной и алгоритмической части собственных изделий [2]. Понимание потребностей клиента, совместные ОКР по созданию специальных исполнений для разных отраслей и накопленный опыт позволяют продукции ООО ЛМП конкурировать с блоками МЭМС инерциальных датчиков и ИНС зарубежного производства. Ранее мы рассказывали об испытаниях беспилотного автомобиля с системой навигации на основе модуля серии ГКВ [3]. Будут и новые истории успеха. Следите за нашими публикациями.

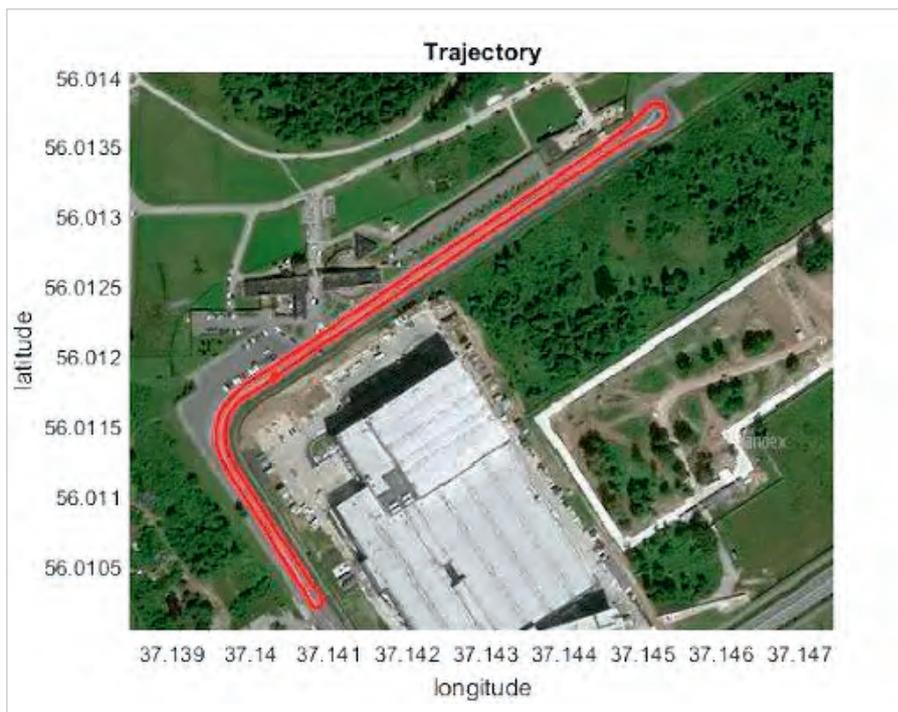


Рис. 14. Трек на месте проведения наземных испытаний (данные GPS)

### Литература

1. Стабилизация антенн. URL: <https://mp-lab.ru/application/antenna-stabilization/>.
2. Бекмачев А., Михеев А. Беспилотная навигация: компоненты и решения // Современная электроника. 2021. № 3. С. 38–41.
3. Инерциальные навигационные системы для беспилотного транспорта. URL: <https://bespilot.com/news/991-mp-lab>. ©

## ИНВЕРТОРЫ «ММП-ИРБИС»

ИНК2500-1С-1U ТУ6589-077-40059437-06

Выходная мощность 2500 Вт/3200 ВА

Инверторы ИНК2500-1С дополняют сеть оперативного постоянного тока (СОПТ) на электрических подстанциях сетью переменного тока.

Позволяют обеспечить бесперебойным питанием нагрузку до 15 кВт на фазу



Все характеристики серии



30 ЛЕТ  
ММП-ИРБИС

# Модули видеоконтроля и связи, распознавания лиц для терминалов СКУД. Обзор

Андрей Кашкаров (ak35@yandex.ru)

Системы видеоконтроля и биометрической идентификации лица всё чаще и чаще встраиваются в терминалы СКУД. На волне актуального тренда безопасности модули видеоконтроля используют с различными уникальными техническими решениями, более того, доступ к видео можно получить удалённо. Параллельно улучшаются технологии определения лиц даже в условиях искажения оригинала (масок и др.). Качество и корректность функционирования системы зависит от её элементов – составляющих: видеокамер и модулей, передачи данных, серверов и ПО, требующих регулярного совершенствования для адекватных реакций, соответствующих вызовам времени. В статье представлены модули видеоконтроля для СКУД и полезные сведения по организации видеоидентификации людей.

## Модули видеоизображения как элемент системы

Модули получения и обработки видеоизображения – основной элемент преобразователя оптического изображения в цифровой видеосигнал, составная часть видеоконтроля и видеонаблюдения в multifunctional электронных устройствах. Для монтажа и эксплуатации модулей видеоконтроля необходимы условия, например – соблюдение температурного режима, наличие системы охлаждения. Закрытые корпуса без вентиляции, расположенные вблизи источники теплового излучения, – таковы нежелательные факторы для монтажа. Рабочий диапазон температур от –40 до +60°C рекомендован к обязательному соблюдению. Нежелательны близкорасположенные источ-

ники электромагнитных излучений, активных химических соединений, а также воздействие прямых солнечных лучей на матрицу видеокамеры.

Рекомендуется использование источника бесперебойного питания во избежание воздействия скачков напряжения или нештатного отключения устройства. Разработчику и наладчику важно знать, что входы модулей не имеют защиты. Случайная подача сигналов и питания на не предусмотренный назначением вход приводит к выходу устройства из строя. Кроме того, модули рассматриваемого типового ряда чувствительны к детонации, вибрации, сотрясению при падении или механическом воздействии. На этом основании, несмотря на металлический корпус с защитой IP65, эти устройства не признают антивандаль-

ными. Вывести из режима корректной эксплуатации их можно механическим воздействием извне.

Модуль видеоизображения SLA-2M6000D, часто встречающийся элемент в портативных системах видеоконтроля, представлен на рис. 1.

Устройство с объективом 6 мм для камеры PNM-7000VD фирмы Wisenet имеет ночной режим с электронным ИК-фильтром, поддержку WDR 150 дБ. Матрица 1/2.8" CMOS 1945x1097 обеспечивает условное разрешение 2,13 Мп и чувствительность 0,055 Лк при F2.0, соотношение сигнал/шум 50 дБ. Угол обзора по параметрам H50, V28, D58. Вес устройства составляет 27 г.

На рис. 2 представлен видеомодуль HikVision DS-KD8003-IME1. Это вызывная панель с ИК-подсветкой и объективом типа Fisheye с условным разрешением 2 Мп (1920x1080), угол обзора по горизонтали 180°, вертикали 96°. Имеет функции контроля доступа, WDR – нейтрализация влияния перепадов уровня освещённости на качество изображения, BLC – компенсация фоновой засветки, подавление шума и эхо-сигнала DNR, компрессионное сжатие видео H264. Стабильно работает в диапазоне температур от –40 до +60°C, пыле- и влагозащита соответствуют стандарту IP65. Модуль имеет механическую кнопку вызова, вырабатывает сигнал тревоги при попытке взлома корпуса, имеет микрофон и динамическую головку для аудиосвязи, уверенно работает при ограниченном освещении. Модель Hikvision DS-KD8003-IME1 для сборной вызывной панели поддерживает подключение до 8 дополнительных модулей или работает как самостоятельное устройство. Имеется поддержка сетевых протоколов TCP/IP, RTSP, SIP. Для сокращения нагрузки на сеть реализована двухпоточная трансляция видеосигнала. Процессор High-Performance Embedded SOCPProcessor, ОС Linux. Спецификация модуля HikVision DS-KD8003-IME1(B)/Surface представлена на рис. 3.



Рис. 1. Внешний вид видеомодуля SLA-2M6000D



Рис. 2. Внешний вид видеомодуля HikVision DS-KD8003-IME1

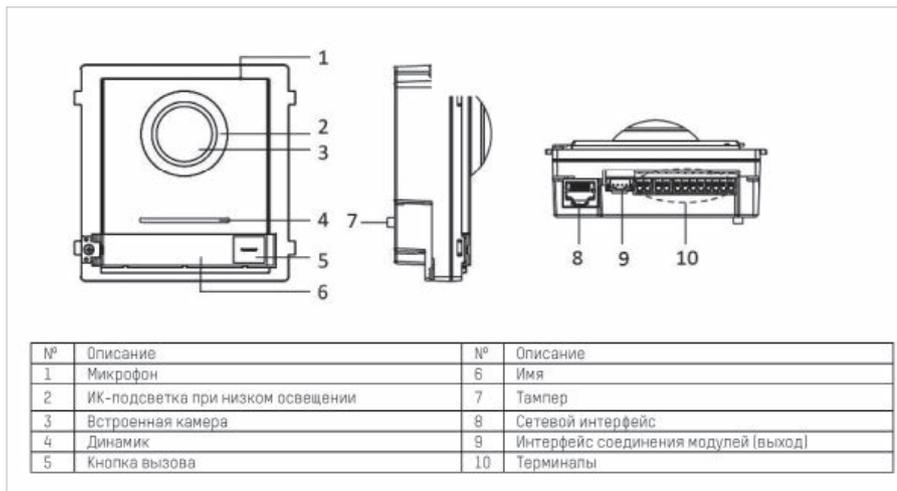


Рис. 3. Спецификация модуля HikVision DS-KD8003-IME1(B)/Surface

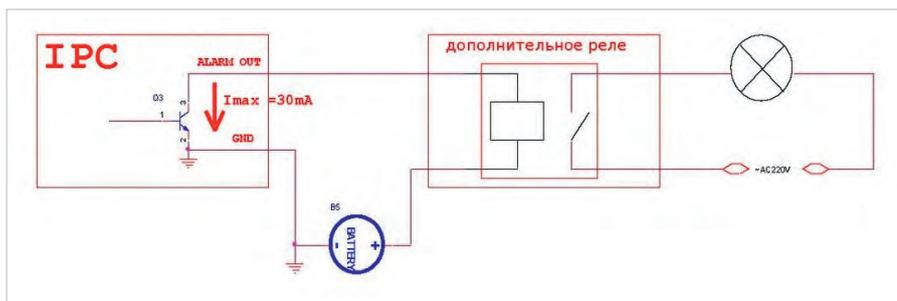


Рис. 4. Подключение нагрузки через реле

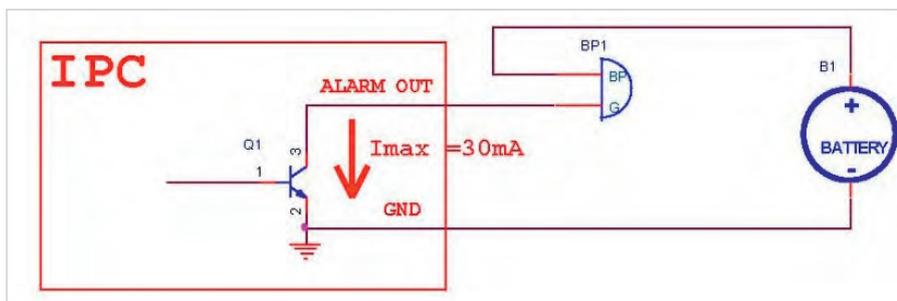


Рис. 5. Схема подключения оконечного узла для малоомощной нагрузки

Системные параметры вызывной панели DS-KD8003-IME1 со встроенным микропроцессором представлены в табл. 1.

Функциональность устройства такова, что возможно управление двумя электромеханическими замками. Выходной ток до 1 А. Казалось бы – что в этом удивительного? Но... таким образом в автоматическом режиме реализовано управление шлагбаумом с помощью контактов «тревожный выход». На рис. 4 представлена схема подключения оконечного узла, коммутирующего устройство нагрузки.

Практически алгоритм работы таков: автомобиль подъезжает, затем с помощью видеокартинки, полученной от модуля, сервер распознаёт номер, сверяет с БД, формирует сигнал на тре-

вожный выход – открывается шлагбаум [9]. Для малоомощных звуковых или светодиодных сигнализаторов схема подключения выходного каскада модуля может иметь вид, представленный на рис. 5.

Это иллюстрация коммутации выходных сигналов модулей видеоизображения и взаимодействия портативных IT-терминалов TFR50-202 с вызывными панелями DS03M, TFR70-210, TFR80-210 с вызывными панелями DKS15102. Подробнее об этом в [5] и [6].

### Системы передачи видеопотока

Качественная работа устройств видеоконтроля зависит от влияния среды и внешних факторов. На радиус действия беспроводного оборудования

Таблица 1. Системные параметры вызывной панели DS-KD8003-IME1

Операционная система	Встроенная система Linux
Метод работы	Включение кнопкой
Параметры видео	
Камера	2 Мп HD-камера, Fisheye объектив с ИК-подсветкой
Стандарт видеосжатия	H.264
Разрешение камеры	Основной поток: 1920×1080 Дополнительный поток: 720×480
Улучшение изображения	BLC, DNR, WDR
Антимерцание	50 Гц, 60 Гц
Угол обзора	Горизонтальный 180°, вертикальный 96°
Аудио	
Аудиовход	Встроенный всенаправленный микрофон
Аудиовыход	Встроенный динамик
Аудиосжатие	G.711 U, 64 Кбит/с
Качество аудио	Подавление шума и эхо
Режим подсветки	ИК-подсветка
Параметры сети	
Ethernet	10M / 100M / 1000M адаптивный Ethernet
Протоколы сети	TCP/IP, RTSP, стандартный SIP
Интерфейсы	
Тампер	1 RS-485; 2 реле; RJ-45
Тревожные входы	4
Релейный интерфейс	2 (30 В, 1 А)
Питание	12 В DC, PoE (IEEE 802.3af/at-совместимые устройства)
Энергопотребление	≤ 10 Вт
Рабочие и температурные условия	-40...+60°C, влажность 10%-95%
Уровень защиты	IP65
Размеры	98×100×44 мм
Установка	Утопленный монтаж, поверхностный монтаж, врезная или накладная с помощью кронштейна

влияют электромагнитное поле вокруг оборудования, погодные условия и возможные препятствия на пути следования сигнала. На практике возможно снижение скорости потока передачи данных (следствие – снижение скорости «кадр в секунду» видеосигнала), «замирания» и обрывы связи. Это условные недостатки почти всех систем беспроводной передачи данных, именно поэтому в системах безопасности, требующих повышенной надёжности, используется соединение по кабелю. Это обеспечивает и большую скорость передачи данных, и большую защищённость от внешних факторов, в том числе от несанкционированного применения устройств глушения беспроводного сигнала на конкретных частотах.



Рис. 6. Внешний вид комплекта передачи сигналов BR-20-8

Систему передачи видеосигнала через Wi-Fi рассмотрим на примере BR-20-8. Возможно подключение до 7 IP-камер или видеосерверов. Дальность действия до 20 км – при благоприятных условиях. На рис. 6 представлен вид системы BR-20-8.

Оборудование обеспечивает подключение до 7 IP-видеокамер или видеосерверов в радиусе покрытия Wi-Fi до 20 км (в зоне прямой видимости). Такие параметры, как условная защита сетевой информации WPA2 (AES), поддержка Half/Full duplex (10/100 Мбит/с) с автоопределением скорости (10/100М), коэффициентом усиления антенны 27 dBi и питание точки доступа через кабель Ethernet до 25 м, делают систему привлекательной для случаев, не требующих особой надёжности [4].

Комплексы передачи видеосигнала работают в режимах «точка-точка» и при подключении нескольких, как правило, уличных видеокамер. Кроме рассмотренной на примере модели сопоставимыми характеристиками и ограничениями обладают BR-20, BR-025, BR-025-8 и др. На практике точка доступа уличного исполнения с антенной подключается к электромонтажному шкафу кабелем «витая пара» длиной 25 м, а видеокамеры – кабелем Ethernet длиной до 100 м. Длина кабеля Ethernet, по которому осуществляется передача данных к точке доступа и её питание, также 25 м. При этом источник питания должен располагаться в отапливаемом помещении, ибо имеет исполнение, рассчитанное производителем для температур не ниже  $-5^{\circ}\text{C}$ , либо в специальных шкафах для уличного исполнения с термокомпенсацией. Тем не менее при наличии



Рис. 7. Вызывная панель DS91406M с поддержкой SIP-протокола

электромонтажного шкафа уличного исполнения со степенью защиты IP54 и диапазоном эксплуатационных температур от  $-40$  до  $50^{\circ}\text{C}$  (ограничения только по параметрам видеокамер), система BR-20-8 обеспечивает передачу данных в суровых погодных условиях.

Цифровой метод передачи данных позволяет лучше защитить информацию от несанкционированного доступа, а также даёт лучшую помехозащищённость видеосигнала по сравнению с аналоговыми передатчиками. Система BR-20-8 и аналогичные функционируют в режиме «прозрачный мост», где IP-камеры доступны по паролю. Антенны с усилением 27 dBi обеспечивают диаграмму направленности  $6^{\circ}$ .

Когда в условиях, некритичных к безопасности, нужно обеспечить видеонаблюдение на удалённом объекте, к примеру, на трансформаторных и газовых подстанциях, стройплощадках, возможно использовать Wi-Fi, так как специально прокладывать другие линии связи нерентабельно или невозможно. В случае с рассмотренной выше системой передачи данных обязательным условием является наличие прямой видимости между точками установки антенн. Управление производится через веб-интерфейс, что позволяет обеспечить удобство настройки и администрирования.

Что касается передачи аналогового сигнала по витой паре или коаксиальному кабелю – это анахронизм эпохи. Тем не менее аналоговые системы видеонаблюдения разработчиками не забыты. От качества кабеля зависит максимальное расстояние уверенной передачи сигнала (без потерь), без специального оборудования усиления – конверте-

ров расстояние не превышает 400 м. А при использовании кабелей типа RG-6 максимальное расстояние при тех же равных условиях составит не более 100 м. Увеличение максимального расстояния передачи видеосигнала без оцифровки по проводной технологии с помощью одно- и многоканальных конвертеров обеспечит дальность трансляции до 3 км. Одно из бюджетных решений, но не самое надёжное. Анахронизмом также является решение использования подвешенных телефонных линий с модулями грозовой защиты портов, необходимых во избежание повреждения оборудования. Тем не менее в некоторых регионах, удалённых от цивилизации, и такое ещё можно встретить.

### Передача IP-видео по кабельным линиям

Передача видеосигнала через кабель с многопарным проводным содержанием реализуется с использованием xDSL, обеспечивающей симметричный канал с использованием технологий G.SHDSL и VDSL2. В первом случае это симметричный мост через существующие проводные линии связи и даже витую пару – на расстоянии до 5–6 км. Скорость передачи данных до 5,7 Мбит/с через однопарный кабель и до 11,4 Мбит/с при использовании соединительного кабеля из 2 пар. Положительным отличием признаком является высокая помехозащищённость и условно низкое влияние друг на друга нескольких G.SHDSL мостов, работающих посредством одного многопарного кабеля. Тем не менее даже через такой канал можно подключить до 7 IP-камер видеонаблюдения. Оборудование по технологии VDSL2, по сравнению с G.SHDSL, обеспечит скорость передачи данных до 100 Мбит/с даже через одну пару кабеля на расстоянии до 1,5 км, но это зависит от качества кабеля. Такое решение превосходит по скорости технологию G.SHDSL, требует одной свободной витой пары, но уступает по максимальному расстоянию передачи сигнала, так как последнее определяется типом кабеля, режимом работы оборудования и наличием помех. Практически на небольших расстояниях технология VDSL2 позволит удлинить сетевой сегмент на несколько сотен метров и подключить удалённые IP-камеры или сервера с суммарным потоком до 70–80 Мбит/с.

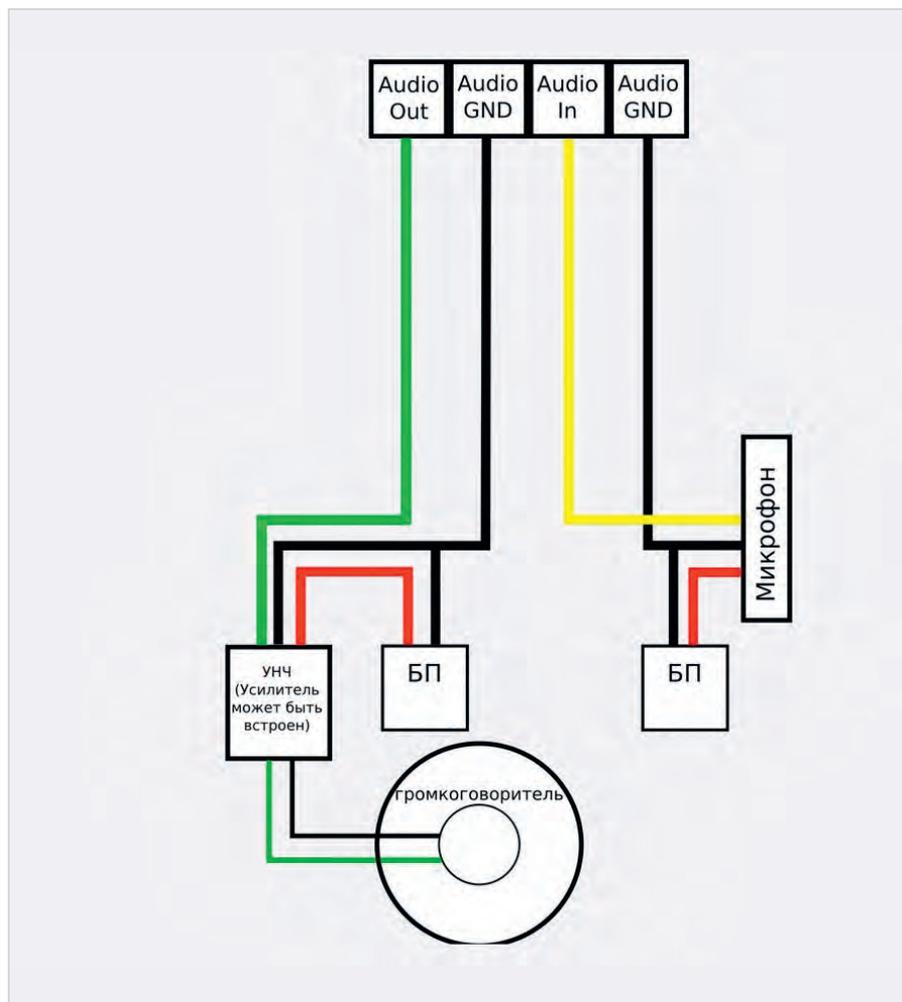


Рис. 8. Конструктивная схема подключения элементов аудиосвязи

механический ИК-фильтр и встроенная интеллектуальная ИК-подсветка (Smart IR) с дальностью действия до 10 м. Мощный ИК-светодиод, созданный по новейшей технологии, заменяет по ресурсу работы 15 типичных и в сравнении с ними отличается высокой стабильностью параметров. Встроенная динамическая головка и микрофон, а также аппаратная обработка аудиосигнала и система эхоподавления WDR обеспечивает качественную аудиосвязь – чёткий распознаваемый звук. На рис. 8 представлена конструктивная схема подключения элементов аудиосвязи.

Особенности подключения: при сопротивлении динамической головки 16 Ом мощность 20 мВт, сопротивление входной цепи микрофонного капсюля 10 кОм. Включение дополнительного микрофона нежелательно: ухудшается чувствительность и возникают шумы.

Итак, с поддержкой SIP-протокола устройство идентифицируется в существующей локальной IP-сети без использования дополнительных приложений, кабелей и оборудования, а может быть также просто внедрено в масштабную территориально-распределённую систему, так как количество SIP-устройств в одной сети не ограничено. Отсюда ясно, что устройство DS91406M востребовано для проектов «Безопасный город». Практика использования подобных устройств с доступом к ним из условного «центра обеспечения безопасности», связанного с органами защиты правопорядка и разведки, распространена и в правовом поле. Если вспомнить нашумевшую историю с московским журналистом Иваном Голуновым, то в одном из телесюжетов (в то время) промелькнула невеста как попавшая на ТВ видеозапись подхода объекта с рюкзаком (весьма похожего на Ивана) к домофону, его идентификация в системе СКУД дома RFID-меткой и проход в парадную. Таким образом, ясно, что доступ к системе SIP может иметь широкий круг лиц, как в реальном времени, так и «в записи», и не всегда они подконтрольны гражданам, обывателям. Это знание не только возможностей электронных устройств видеоконтроля, и их возможного применения не будет лишним и для разработчика РЭА.

Для обеспечения обзора с видеокмеры домофона объектив DS91406M легко направить на объект наблюде-

И совсем другое дело – системы передачи видеосигнала, IP-камеры и вызывные панели в проекте «безопасный регион, город, подъезд, дом» [7]. Рассмотрим вызывную панель DS91406M с поддержкой SIP-протокола, внешний вид которой представлен на рис. 7.

Устройство в антивандальном корпусе степени IK08, класс пылевлагозащиты IP66, обеспечивает подключение к телефонной IP-сети, работа по SIP-протоколу, то есть подключение к SIP-клиентам через Интернет без статических IP-адресов. Программный WDR, работа в беспроводном режиме PoE IEEE 802.3 af (Class 0), End-Span, Mid-Span. Уверенная эксплуатация в диапазоне температур –45...+50°C, интеллектуальная ИК-подсветка (Smart IR), дальность действия до 10 м, управление вызывной панелью с ПК, ноутбука или мобильного устройства делает устройство современным и перспективным. Среди других решений возможна передача сигналов SOS со станций экстренного вызова в ситуационные центры (в рамках программ «безопасный город») [7]; на режимных

объектах – использование инфраструктуры для аудиосвязи домофон-домофон. Но есть любопытные особенности таких систем.

Условно открытый SIP-протокол создан для интеграции IP-домофона в IP-сеть. Так, SIP-видеодомофон BEWARD DS91406M можно подключить к SIP-совместимым устройствам других производителей (SIP-домофоны, IP-телефоны, IP-видеофоны, SIP-мониторы, IP-трубки, SIP-софтфоны, мобильные SIP-клиенты для различных платформ). Причем IP-домофон может работать через IP-АТС или связываться с другим SIP-устройством напрямую. 1,3 Мп сенсор объектива SONY Exmor, созданный по технологии цифрового шумоподавления 2D/3DNR, казалось бы, мал, однако обеспечивает относительно хорошую детализацию изображения и обладает хорошей чувствительностью в условия недостаточной освещённости (0,01 лк (день) / 0,001 лк (ночь)). Для наблюдения в условиях ограниченного освещения и даже в кромешной тьме, в вызывной панели предусмотрены электро-



Рис. 9. Иллюстрация изменения угла обзора



Рис. 11. Внешний вид многоабонентной видеопанели DKS850100

ния. Эта возможность проиллюстрирована на рис. 9.

Устойчивость к внешней среде определяется антивандальным и пылезащищённым корпусом и возможностью уверенной работы в диапазоне температур от  $-45$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Вызывную панель DS91406M, поддерживающую распространённые среди разработчиков сетевые протоколы, можно интегрировать в состав системы безопасности и контролировать как IP-камеру с функционалом записи звука и видео, как постоянно, так и по требованию – нажатию кнопки вызова или детектирования движения.

Сопоставимыми характеристиками обладают модели DSN23215PS,

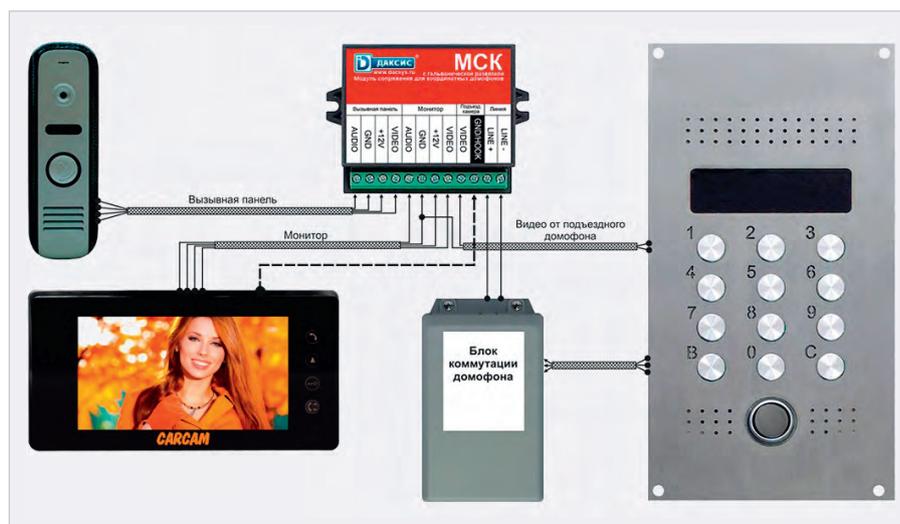


Рис. 10. Иллюстрация взаимодействия вызывного модуля и мультиабонентской панели

DSN85017P-FC1, DS85006MP, DS85006MP-3L и др. Видеодомофоны DS-KH6320-(W)TE1, DS-KH8350-(W)TE1, DS-KH8520-(W)TE1 и вызывные панели (V серия) DS-KV6113-(W)PE1, DS-KV8X13-WME1 и дверной звонок DS-KV6103-PE1, модульная вызывная панель DS-KD8003-IME1 принадлежит ко второму поколению (современно) устройств разработки 2017–2021 гг. Первое поколение устройств и элементов домофонов представлено моделями DS-KH6210, DS-KH6310-(W,L), DS-KH8301-(WT), DS-KH8300-T, вызывными панелями (V серия): DS-KV8X02-IM, DS-KV8102-VP(IP), абонентскими вызывными панелями (D серия) DS-KD3002-VM, DS-KD8002-VM, DS-KD8102-V [10].

Взаимодействие вызывного модуля и мультиабонентской панели представлено на рис. 10.

### Многоабонентные IP-домофоны

На примере многоабонентной панели в антивандальном исполнении DKS850100 производства SONY рассмотрим семейство многоабонентных домофонов. Структурная схема их работы представлена выше, а внешний вид модели DKS850100 представлен на рис. 11.

Устройство для стабильной работы в диапазоне температур от  $-50$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  с фальш-объективом даёт возможность замены модулей видеоизображения, которые рассмотрены в первой части статьи, без снятия и разборки домофона. Разрешение видеокамеры 1,3 Мп. Поддержка доступа в формате RFID Mifare до 8500 RFID ключей. Дуплексная передача сигнала

ла аудио с поддержкой 9999 абонентов – при этом 5 направлений вызова на одного абонента. Поддержка протокола SIPv2. ИК-подсветка до 10 м. Морозоустойчивый 8-символьный светодиодный дисплей и возможность подключения дополнительной двери и считывателя Wiegand для неё. Важно, что 8-символьный светодиодный дисплей с адаптивной яркостью свечения отображает информацию без задержек при температуре до  $-50^{\circ}\text{C}$ , на что не способны дисплеи, выполненные по типовой ЖК-технологии. Управление/открытие двери обеспечено по индивидуальному коду абонента, равно как и регистрация RFID ключа по тому же индивидуальному принципу. Опционально видеодомофон обеспечит вызов через координатно-матричные аналоговые сети до 900 абонентов. Имеет резервное хранилище на 1500 кодов на случай прошивки либо перезагрузки IP-домофона. Готовность к отработке базового функционала через 1 с после подачи питания (доступ в подъезд, вызов на аналоговые трубки). Поддержка четырёхзначного номера абонента (до 9999) позволяет применять IP-домофон DKS850100 в гостиницах и в зданиях с большой этажностью. С помощью IP-домофона DKS850100, называемого также гибридным, возможно совершать вызовы на координатно-матричные аналоговые сети объёмом до 900 абонентов. Для этого нужно установить коммутатор ККМ-108 или ещё более современный. Всё это даёт возможность применять устройство как IP-камеру, не манкируя записью звука и видео постоянно, при вызове абонента, открытии двери или по сигналу датчика движения. Сопоставимыми характеристиками обладают модели DSN23215PS,

ставимыми характеристиками обла- дают модели DKS850174, DKS850962 и аналогичные.

### Программное обеспечение и приложения

Это третья важная составляющая перспективного развития отрасли, где качество и надёжность работы всей системы зависит от тех же требо- ваний, предъявляемых к её элементам на манер поговорки: «скорость эска- дры определяет самый тихоходный корабль». У современных видеока- мер собственный веб-интерфейс, что даёт возможность быстрой настройки и доступа. Подключение и настройка IP видеокамер к облачному P2P сервису видеонаблюдения через Интернет осу- ществляется посредством приложений (ПО). Это обязательный элемент взаи- модействия по единому протоколу IP видеокамер, домофонов и др. видео- регистраторов. В отличие от сервиса ezviz, где можно только подключать- ся к устройствам по средствам техно- логии P2P (облачный сервис связыва- ет камеру и смартфон по Интернету), в современном ПО можно подключать- ся к устройству видеоконтроля через

Интернет «напрямую», с помощью ста- тического адреса, и локально (в одной локальной сети с роутером мгновенно просматривать видео с камер, обраща- ясь к устройству по его IP в обоих пото- ках – основном и вторичном). Таково приложение Ivms-4500 [9]. А техноло- гия Beward Bi-Scan позволяет опреде- лить/отличить лицо живого челове- ка, исключая возможность доступа по имитации, фотографии, определить, надета ли на человека маска. При этом функционал распознавания лиц рабо- тает автономно и не зависит от под- ключения к локальной сети или нали- чия Интернета.

Отсюда важно, чтобы элементы ПО отвечали современным вызовам вре- мени. Основные компоненты сервер- ной части ПО – RSM, CMS, SS и SMS.

- RSM (Remote Site Manager): сервер, управляющий несколькими CMS.
- CMS (Central Management Server): ядро системы, сохраняющее ресурсы и передающее их другим серверам.
- SS (Storage Server): сервер хранения.
- SMS (Stream Media Server): сервер, ко- торый переадресует потоки.

RSM является центром управления зарегистрированными CMS, где воз-

можно смотреть информационный видеопоток, контролировать тревож- ные сигналы. CMS – ядро ПО, отвеча- ющее за авторизацию и управление. SMS служит в основном для дистрибу- ции и парсинга видеопотока в режиме реального времени. SS получает видео- сигнал через SMS или напрямую от кодирующих устройств, обрабатывает информацию по индексации и сохра- няет видео/аудиофайлы.

CMS включает в себя следующие компоненты:

- VRM (Video Recording Server): в ос- новном отвечает за конфигурацию расписания записи и поиск запи- санных видео. Быстродействующий VRM организует унифицированное управление устройствами-хранили- щами и поддерживает объём хране- ния;
- VAG (Video Access Gateway): управ- ляет доступом системы к видеокамерам и сканирует их рабочее состояние;
- ES (Event Server): управляет и обра- батывает разные «тревожные сиг- налы»;
- CES (Cascading Event Server): переда- ёт тревожные сигналы зарегистриро- ванным в RSM CMS;

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

# ЭЛЕКОНД



**оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы**  
 K50-15, K50-17, K50-27, K50-29, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-97(чип), K50-98, K50-99, K50-100, K50-101(чип), K50-102, K50-103, K50-104, K50-105, K50-106

**объемно-пористые танталовые конденсаторы**  
 K52-1, K52-1M, K52-1БМ, K52-1Б, K52-9, K52-11, K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24, K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28, K52-29, K52-30

**оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы**  
 K53-1А, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип), K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип), K53-79(чип), K53-80(чип), K53-82

**ионисторы (суперконденсаторы)**  
 K58-26, K58-27, K58-28, K58-29, K58-30, K58-31

**накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов МИК, МИЧ, ИТИ, НЭЭ**

## КОНДЕНСАТОРЫ

разработка и производство



Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, 3  
 Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48, 4-27-53  
 e-mail: [elecond-market@elcudm.ru](mailto:elecond-market@elcudm.ru), [www.elecond.ru](http://www.elecond.ru)



Реклама

● MQ (Message Queue): отвечает за передачу информации между процессами.

ПО для оборудования видеоконтроля распространяется бесплатно (до 36 каналов). Дополнительные преимущества – файловый мультимедиа, интерактивная карта, интеллектуальный поиск, детектор движения, мультимониторный режим, поддержка PTZ, просмотр архива. Значение профессионального ПО в видеонаблюдении трудно переоценить. Централизация данных с камер, видеомониторинг в режиме реального времени, обработка данных, их хранение, просмотр из архива. Поэтому современные возможности позволяют создавать системы видеоконтроля неограниченного масштаба с отдельными составляющими, разнесёнными на тысячи километров, с возможностью модернизации, масштабирования, внедрения дополнительных элементов аналитики данных, подключения к многофакторным «облачным» БД. Так, сетевые или гибридные видеорегистраторы могут взаимодействовать в единой системе.

ПО для видеоконтроля позволяет выводить изображение с десятков (до 36) IP-камер на монитор при максимальном разрешении 2592×1944 (для мегапиксельных камер) и скорости отображения до 25 к/с с оптимальной конфигурацией рабочего стола. Поддержка мониторов с широкоформатным разрешением – с диагональю от 19" с отношением 16:9 и 16:10. Многоканальная «организация» видеоконтроля весьма удобна. Управление «купольными» PTZ-камерами с функцией поворота осуществляют при помощи как меню управления, так и мультимедийного джойстика. Популярный функционал: создание предустановленных позиций для конкретной видеокамеры; назначение созданных позиций кнопкам быстрого перехода; создание неограниченного числа обходов для каждой камеры; возможность задавать несколько одинаковых позиций в обходе; запуск обхода по умолчанию при старте ПО; переход в позицию или запуск обхода при тревоге по датчику; групповой запуск обходов всех PTZ-камер; задание действия PTZ-камере после вынужденной остановки – лишь некоторые из полезных разработчику функций. Также реализуется и интеллектуальная работа оборудования при поступлении сигнала «тревога»: в автоматическом режиме

обрабатываются тревожные события от IP-камер, IP-серверов с подключёнными периферийными датчиками (датчик открытия, разбития стекла, микроволновый датчик движения и др.). С последующей оперативной реакцией на возникновение тревожного события.

Доступный и интуитивно понятный интерфейс, наличие двустороннего аудиоканала с возможностью режима «конференция» по нажатию одной кнопки, а также фиксация в памяти – журнале событий обеспечивает улучшенный контроль за ними и действиями оператора. Тем не менее современное ПО отличается разграничением прав доступа и функционала «администратора» и «операторов», возможен монопольный режим работы приложения, при котором пользователь не получит доступ к «рабочему столу» операционной системы и её специальным возможностям. Также разделяется запрет управления приложениями и камерами.

Версии x86 и x64 содержат одинаковый функционал, но, как правило, ПО в качестве приложения к оборудованию распространяется бесплатно. Более того, часть приложений универсальны, таким образом, могут использоваться на серверах и с оборудованием разных производителей. В этом отношении конкуренции почти нет. Универсальность в части ПО заметна и в том, что выпускаются разные версии программ-установщиков, к примеру, full и lite, описанные в [6]. Версия lite – облегчённый установщик полнофункционального ПО. Версия full дополнительно содержит системные компоненты (.NET Framework и др.). Производитель рекомендует версию full использовать при первичной установке ПО и его обновлении, в остальных случаях – версию lite. На примере программы IP Visor x64 заметим, что выпускаются разные версии, соответственно, под конфигурацию систем видеонаблюдения. Версия x64 имеет преимущество – ей доступен больший объём оперативной памяти ПК. Такое ПО стабильно работает с большим количеством камер при получении видеопотоков в высоком разрешении или при использовании современных форматов кодирования видео (H.265). Наоборот, версия IP Visor x86 подходит для систем без Windows x64. Разумеется, все бесплатные приложения ПО имеют вполне понятные ограни-

чения электронной (накопительной) памяти. Для приложений к Windows x86 доступно всего 4 ГБ оперативной памяти, что недостаточно для систем видеонаблюдения, состоящих из десятков видеокамер. Это та самая «ложка дёгтя», которая идёт приложением ко всему условно бесплатному. Впрочем, есть и бесплатные версии ПО, не имеющих таких ограничений, но их реклама не входит в задачи автора статьи. Профессиональный разработчик найдёт их самостоятельно.

Поддерживаемые операционные системы для современных систем: Windows 7 SP1, 8, 8.1, 10. Прекращение поддержки более старых версий ОС связано с желанием производителей следовать в ногу со временем и инициировать потребителей к смене оборудования. Обоснования этого посыла приведены в следующей статье.

Особое значение имеют сбор статистических данных в розничной торговле для повышения эффективности бизнеса и интегрированные в ПО интеллектуальные алгоритмы видеоанализа – обнаружение появившихся/исчезнувших предметов, трекинг движущихся объектов, подсчёт объектов, определение длины очереди, распознавание автомобильных номеров, «поиск» и распознавание лиц и др. сценарии реакции системы на фиксируемые события.

Будущее наше не так уж туманно, как можно предположить на первый взгляд, и новейшие устройства, определяющие по видеоизображению лица персональные данные человека, существуют. Но пока в ограниченных, несерийных масштабах [10]. Широко не используются в быту, хотя есть к тому техническая возможность. Проблема специализированного (ограниченного) применения таких электронных систем на базе компонентов, рассмотренных в статье, банальна. Есть существенные риски, связанные с невозможностью или нежеланием уполномоченных структур открыть посредством облачных хранилищ полный доступ к базе данных лиц, обнаруженных видеокамерами или давших добровольное согласие на включение самих себя в такие БД. Хотя применение локальных баз данных, к примеру, созданных самим пользователем для организации автоматизированного доступа в подконтрольные ему помещения, вполне возможно – с соблюдением требований законодательства о защите персональных дан-

ных, то есть на добровольной основе лиц, желающих попасть в такую БД. На рис. 12 представлена иллюстрация СКУД будущего – видеодомофона «завтрашнего дня».

С помощью ПО, определяющего человека по видеокартинке, открываются его персональные данные и индицируются на дисплее устройства. Тот, к кому пришли, без утомительного поиска информации, в автоматическом режиме реального времени получает текстовую (и голосовую – возможны разные формы) информацию о людях, заявивших право на доступ или общение. На основе информации первый принимает решение о качестве, продолжительности коммуникации, отказе или разрешении доступа. Излишним будет напомнить, что соответственным образом обученная с помощью искусственного интеллекта система – прообраз современной СКУД – может автоматически пропускать или запрещать доступ конкретным людям на основании полученного (сканированного) изображения и оперативной информации сервера; данных, находящихся в облачном хранилище.

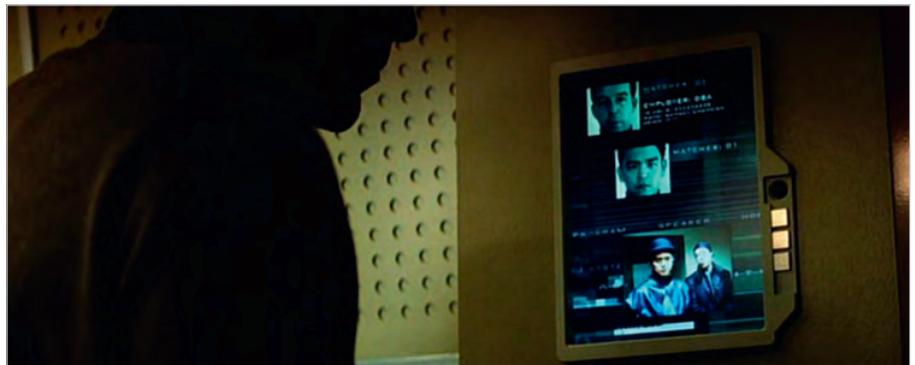


Рис. 12. Видеодомофон «завтрашнего дня»

### Литература

1. Кашкаров А.П. Системы видеонаблюдения. Практикум. Ростов н/Д: Феникс. 2014. 123 с.
2. Кашкаров А.П. Видеокамеры и видеорегистраторы – для каждого дома и автомобиля. М.: ДМК Пресс, 2014. 118 с.
3. Кашкаров А.П. Системы безопасности и устройства кодового доступа. М.: ДМК-Пресс, 2014. 109 с.
4. IP видео через Wi-Fi. URL: <https://www.beward.ru/katalog/sistemy-peredachi-videosignala/besprovodnye-komplekty-peredachi-ip-video-po-wi-fi/br-20-8/>.
5. Терминалы СКУД. URL: <https://www.beward.ru/katalog/skud/>.
6. Характеристики терминалов доступа. URL: <https://www.beward.ru/katalog/skud/terminaly-dostupa/>.
7. Специальное оборудование по проекту «Безопасный регион»: IP-камеры и вызывные панели. URL: <https://www.beward.ru/katalog/specoborudovanie/bezopasny-region/>.
8. ПО для систем видеонаблюдения. URL: <https://vicam-krym.ru/stati/programmy-idrugoe-po-dlya-sistem-videonablyudeniya-hikvision>.
9. Подключение IP-видеокамер. URL: <https://hikvision.ru/faq/common..>



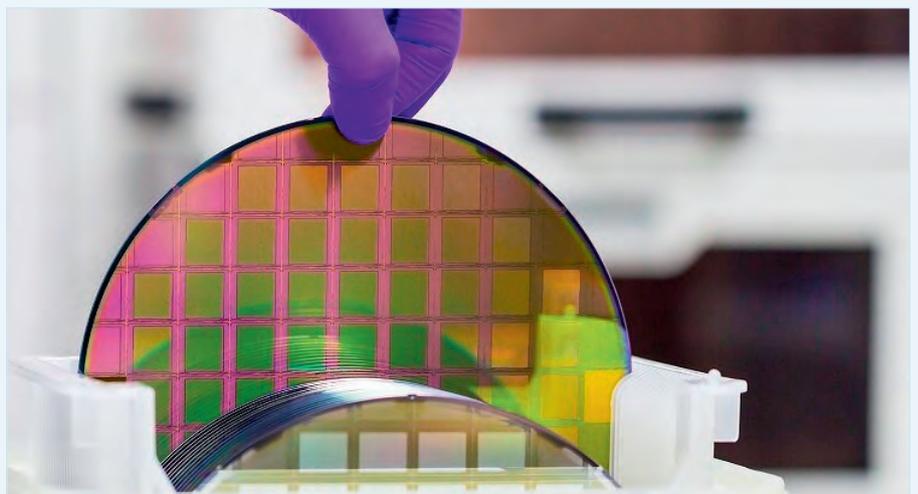
## НОВОСТИ МИРА

### Поставки чипов в Россию полностью восстановились вопреки западным санкциям

Поставки микрочипов и другой полупроводниковой продукции из-за рубежа в Россию по-прежнему осуществляются, несмотря на введённые западными странами санкции. Американское издание The Wall Street Journal считает, что импорт чипов в нашу страну вернулся к уровню 2021 г., и в этом отечественному бизнесу помогли новые цепочки поставок, выстроенные с участием Китая и некоторых других стран-посредниц, таких как Турция.

России удалось довести среднемесячные объёмы импорта интегральных микросхем и электронных компонентов до уровня 2021 г. после значительного спада в первой половине 2022 г., вызванного санкциями западных стран. Об этом сообщило издание The Wall Street Journal, проанализировавшее статистические данные ООН, таможенной службы КНР и американской НКО C4ADS.

Согласно выводам издания, поставки в Россию осуществляются через третьи страны и непосредственно из Китая, причём на долю последнего приходится более 50% от их суммарного объёма. Из полученных



источником данных таможенных органов КНР следует, что в Россию из этой страны в 2022 г. было поставлено чипов на сумму \$179 млн. Годом ранее этот показатель составил \$74 млн.

Данные таможи КНР также свидетельствуют о том, что по итогам 2022 г. местным компаниям удалось почти вдвое увеличить объём экспорта в Турцию отдельных видов полупроводниковых изделий, в частности, диодов и транзисторов. В целом же экспорт подобной продукции из КНР вырос лишь на 36%.

Согласно статистике ООН, экспорт полупроводников из Турции в Россию увеличился с \$79 тыс. в 2021 г. до \$3,2 млн в 2022 г., то есть более чем в 40 раз. Турция, воздержавшаяся от санкций против России, как отмечает WSJ, стала одним из крупнейших экспортеров всевозможной высокотехнологичной продукции в нашу страну. По данным ООН, совокупный объём турецкого экспорта электрооборудования и электроники в Россию удвоился в деньгах по итогам 2022 г. и достиг показателя в \$559 млн, констатирует издание со ссылкой на данные ООН.

*cnews.ru*

# Квантовые электронные компоненты

## Часть 1. Молекулярная электроника и квантовые точки

Виктор Алексеев, к.ф.-м.н

Увеличение функциональных возможностей единицы объёма электронного устройства является основной тенденцией развития современной микроэлектроники. Для того чтобы в каждую полупроводниковую микросхему можно было встроить больше новых и сложных функций, базовый транзистор должен стать меньше, а его энергопотребление должно быть сведено к минимуму. Решить эту задачу помогают нанотехнологии, результаты разработок которых достигли за последние десятилетия впечатляющих результатов. Были разработаны нанопроволоки, нанопроводники, нанотрубки, наноточки, наноплоскости, нанотранзисторы. Технические аспекты производства этих изделий относятся к компетенции так называемой междисциплинарной научной дисциплины, получившей название «молекулярная электроника». Это направление рассмотрено в первой части статьи. Кроме того, в первой части описаны основные типы квантовых точек. Вторая часть статьи посвящена квантовым транзисторам.

### Введение

Основная тенденция развития современной электроники связана с миниатюризацией комплектующих. Задача заключается в том, чтобы увеличить функциональные возможности единицы объёма электронного устройства. Эта тенденция проявляется в многочисленных примерах, которые можно повсеместно наблюдать в окружающей нас действительности. Мобильный телефон, весивший когда-то на заре своего существования несколько килограммов, сегодня размещается в наручных смарт-часах. Первые огромные навигаторы сегодня выглядят, как маленькая бирка, которую можно прикрепить к ошейнику собаки или кошки. Авиационная и космическая техника, микроминиатюрные медицинские камеры и многие другие электронные устройства поражают воображение соотношением размеров и возможностей.

Для увеличения количества полупроводниковых микросхем, установленных на ограниченной поверхности кремниевой (Si) подложки, естественно, необходимо уменьшить размер самой полупроводниковой микросхемы. Для того чтобы в каждую полупроводниковую микросхему можно было встроить больше новых

и сложных функций, базовый транзистор должен стать меньше, а его энергопотребление должно быть сведено к минимуму.

Лауреат Нобелевской премии Ричард Фейнман в 1959 году во время ежегодного собрания Американского физического общества (California Institute of Technology) прочитал лекцию под названием «На дне есть избыток свободного пространства» (There's Plenty of Room at the Bottom). В этой лекции Фейнман предсказал появление в ближайшем будущем устройств, работающих на молекулярном уровне [1].

Можно полагать, что эта лекция послужила основанием для зарождения нового научного направления манипулирования материей на атомно-молекулярном уровне. В настоящее время данное направление получило название «нанонаука». Идеи Фейнмана развивались по двум направлениям этой науки: «top-down» и «bottom-up».

Подход «top-down» подразумевает чисто механическое создание устройств с размерами десятки нанометров. Примером могут служить современные микрочипы. Например, площадь битовой ячейки SRAM в последней серии микросхем N3 TSMC имеет размеры 140×140 мкм, а соединительные проводники – несколько

нанометров. На одном квадратном миллиметре кристалла такого чипа содержатся сотни миллионов транзисторов [2].

За шестьдесят лет, прошедшие со дня легендарной Фейнмановской лекции, нанонаука и нанотехнологии достигли фантастических результатов. Некоторые открытия стали реальными прорывными научными событиями научно-технического прогресса [3].

Перечислять все эти достижения в рамках данной статьи не представляется возможным.

В качестве наиболее интересных разработок, которые внесли существенный вклад в развитие микроэлектроники, можно отметить следующие:

- 1974 г., Mark A. Ratner, Arieh Aviram «Основы молекулярной электроники» [4];
- 1981 г., Alexey Ekimov «Открытие нанокристаллических квантовых точек в стеклянной матрице» [5];
- 1983 г., Louis Brus «Открытие коллоидных квантовых точек» [6];
- 1987 г., Dimitri Averin, Konstantin Likharev «Транзистор с одноэлектронным туннелированием (SET)» [7];
- 1998 г., Cees Dekker «Создание транзистора с использованием углеродных нанотрубок» [8].

Именно эти достижения будут кратко рассмотрены в данной статье.

### Молекулярная электроника

Концепция «bottom-up» подразумевает пошаговое создание наноструктур – атом за атомом или молекула за молекулой с использованием физических и химических методов синтеза и самосборки.

Химический синтез позволяет получать необработанные материалы, которые можно использовать либо непосредственно в продукте в их объёмной неупорядоченной форме, либо в качестве строительных блоков для более совершенных упорядоченных материалов. Метод «bottom-up», при котором атомы или молекулы организуют-

ся в упорядоченные наноструктуры за счёт химико-физических взаимодействий между ними, получил название «самосборка».

Последние двадцать лет стремительно развивалось новое междисциплинарное научное направление, получившее название «молекулярная электроника» (МЭ) [4]. Основной задачей этой дисциплины, охватывающей некоторые разделы мезоскопической физики, квантовой химии, криогенной технологии и материаловедения, является разработка и изучение молекулярных блоков, обладающих свойствами, необходимыми для их использования в качестве элементарных структур электронных компонентов. То есть молекулярная электроника имеет дело с объектами размеров на уровне молекул. Напомним, что диаметр человеческого волоса в среднем равен 100 нм, а диаметр хромосомы человека – 2,5 нм.

В настоящее время технологии, разработанные в рамках МЭ, используются при производстве чипов, микросенсоров, светодиодов с ультраточной настройкой длины волны и в других аналогичных приложениях.

В качестве одного из примеров можно привести «квантовую проволоку» (quantum wire – QW), представляющую собой проводник с поперечным сечением около нескольких нанометров, в котором квантовые эффекты влияют на протекание через него электрического тока. В общем случае, если диаметр проводника составляет 1–5 нм, электроны в нём будут испытывать так называемое «квантовое ограничение» в поперечном направлении (quantum confinement in the transverse direction), при котором происходит сжатие электронов и электронных дырок до размеров, приближающихся к критическому квантовому измерению, вызывающему образование экситонов. Поэтому нанопроволоки характеризуются только двумя степенями свободы [9].

В результате сопротивление проволоки не подчиняется классическому закону  $R = \rho \cdot L/S$ . Вместо этой простой формулы для вычисления сопротивления нанопроволоки нужно проводить сложный расчёт значений поперечных энергий удерживаемых электронов с учётом энергии квантования. Аналогичным образом квантовые свойства проявляются также в оценках ёмкости и индуктивности петель из нанопроволоки.

Различные типы нанопроволоки широко применяются в электронной промышленности [10].

К классу QW относятся также углеродные нанотрубки (carbon nanotube – CNT), которые представляют собой кристаллическую структуру из атомов углерода в виде трубки с диаметром от 0,4 до 5 нм.

Наряду с естественными аллотропами графитом и алмазом одностенные углеродные нанотрубки (SWCNT) представляют собой одну из искусственных структурно-модифицированных форм углерода.

С помощью методов МЭ в 2004 году был изготовлен другой аллотроп углерода, получивший название «графен» (graphene). Этот двумерный кристалл углерода состоит из одного слоя атомов, расположенных в гексагональной наноструктурной решетке.

Структуру одностенной углеродной нанотрубки SWCNT можно представить как свёрнутые одиночные листы графена (рис. 1). Эта прокатка может выполняться под разными углами и с разной кривизной, что приводит к различным свойствам нанотрубок. При этом диаметр трубки может варьироваться в диапазоне от 4 до 40 нм.

Свойства углеродных нанотрубок в значительной степени зависят от типа конечной структуры. То, под каким углом и как плотно «закатано» в трубку «полотно» графена, определяет физические, химические и электрические свойства конечного типа SWCNT [12].

Существующие методики позволяют синтезировать наноуглеродные трубки со свойствами металлических проводников или полупроводников, а также изоляторов.

Одна из конструкций под названием «многостенные углеродные нанотрубки» (MCNT) состоит из вложенных друг в друга, слабо связанных между собой ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями одностенных углеродных нанотрубок.

Механические, электрические и электрохимические (суперконденсаторные) свойства углеродных нанотрубок хорошо известны.

Из-за наноразмерного поперечного сечения электроны распространяются только вдоль оси CNT. В результате углеродные нанотрубки часто называют одномерными проводниками.

Определённые типы CNT обладают уникальной электропроводностью. Теоретически CNT с высокой элек-

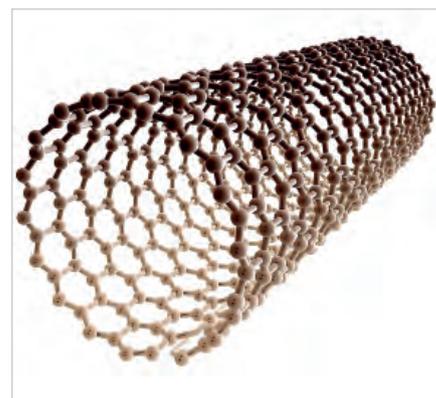


Рис. 1. Структуру одностенной углеродной нанотрубки SWCNT можно представить, как свёрнутые одиночные листы графена [11]

тропроводностью («металлические» нанотрубки) могут работать при токах, плотность которых более чем в 1000 раз превышает допустимую плотность тока в меди [13].

С помощью углеродных нанотрубок можно создавать полупроводники различного типа. В зависимости от типа металла, имплантируемого в кристаллическую структуру CNT, получаются полупроводники с различным типом проводимости, с малой или средней шириной запрещённой зоны.

Легирование углеродных нанотрубок отличается от легирования кремния. Например, щелочные металлы, обладающие избытком электронов, приводят к проводимости n-типа, поскольку они отдают электроны  $\pi$ -электронной структуре нанотрубки. Напротив, акцепторы  $\pi$ -электронов, такие как  $FeCl_3$  с дефицитом электронов, действуют аналогично примеси p-типа вследствие того, что они оттягивают  $\pi$ -электроны от вершины валентной зоны. В полупроводниках такого типа ширина запрещённой зоны может варьироваться от нуля до примерно 2 эВ, а электропроводность может иметь металлический или полупроводниковый характер.

Используя углерод вместо кремния, который применяется в стандартной технологии, можно будет получать транзисторы CNTFET с уникальными электрическими, оптическими, механическими и тепловыми характеристиками [14].

Есть одностенные углеродные нанотрубки, которые имеют одну из самых высоких среди существующих в природе материалов прочность на растяжение. Поскольку прочность зависит от структуры нанотрубки, а внутрен-

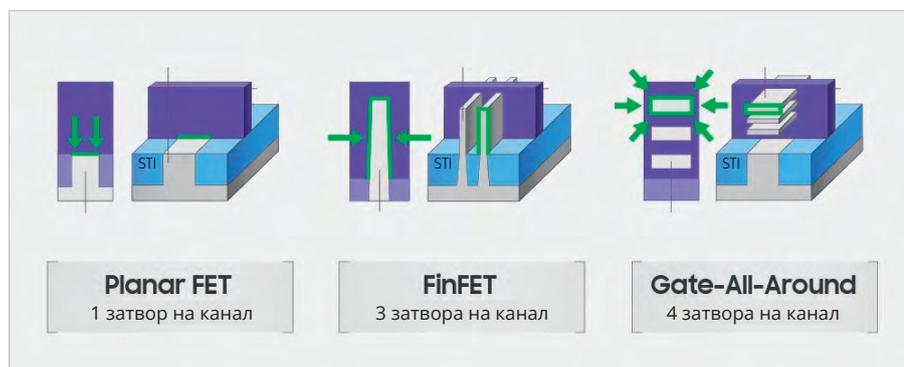


Рис. 2. Три основных типа конструкций транзисторов микрочипов SoC [20]

нее межатомное напряжение наиболее сильное в структурах трубки, изогнутой в виде «кресла», то и самые высокие значения прочности на разрыв наблюдаются именно в таких типах CNT [15].

Эти и другие уникальные свойства углеродных нанотрубок находят всё большее применение в таких приложениях, как производство элементов микроэлектроники, системы очистки от вредных примесей, новые типы аккумуляторов, фильтры электромагнитного излучения, сверхточные оптические системы контроля, ударопрочные композиционные материалы и многие другие [16–18].

Для производства углеродных нанотрубок были разработаны специальные методы, среди которых можно отметить такие, например, как: дуговой разряд; лазерная абляция; химическое осаждение из паровой фазы (CVD); диспропорционирование монооксида углерода под высоким давлением (HiPCO). Большинство этих процессов происходит в вакууме или с технологическими газами. Более подробную информацию на эту тему можно найти в статье [19].

Наибольших коммерческих успехов молекулярная электроника добилась в производстве современных микрочипов SoC. Это действительно так, если учесть, что годовой оборот мирового рынка микроэлектронных компонентов составляет сотни миллиардов долларов. Современные чипы system-on-a-chip (SoC) содержат сотни миллионов транзисторов на одном квадратном миллиметре кристалла. Конструкция транзисторов этих чипов исторически прошла через три этапа. Три основных типа конструкций транзисторов микрочипов SoC показаны на рис. 2.

В основном все транзисторы в чипах SoC представляют собой простейшие транзисторные ключи, содержа-

щие исток, сток, затвор, подложку. То есть этот ключ (gate), переключаемый внешним напряжением, либо открывает канал протекания тока (channel), либо перекрывает его, обеспечивая тем самым на выходе логические ноль или единицу.

Наиболее широко используемые транзисторы в современной полупроводниковой промышленности относятся к классу металло-оксидных полупроводников (МОП). На крайней слева картинке (рис. 2) показана структура планарного МОП – транзистора (planar), у которого затвор и проводящий канал расположены в одной плоскости. На рис. 2 показаны три его основные части – металлический электрод, оксидный изолятор и полупроводниковый канал. Планарная конструкция имеет ограничения по минимизации, связанные с тем, что по мере того, как расстояние между истоком и стоком становится меньше, затрудняется работа затворов в качестве переключателя (эффект короткого канала – short-channel effect, SCE).

С целью преодоления эффекта SCE был разработан транзистор следующего поколения с полным обеднением (Fully Depleted transistor). В этом транзисторе используется тонкий кремниевый канал (thin silicon), позволивший эффективно управлять миниатюрным затвором. Вместо плоской 2D-конструкции в этом транзисторе используются вертикальные ребра с размещённым внутри прямоугольным каналом, который соединён с затворами с трёх сторон (средняя схема на рис. 2). Таким образом, ребристый транзистор имеет объёмную структуру, которая позволяет трём сторонам канала (исключая его дно) контактировать с затворами. Поскольку этот тонкий стоячий канал чем-то напоминает спинной плавник рыбы, его также называют плавниковым тран-

зистором (fin transistor). Кроме того, что 3D-контакт с затворами улучшает характеристики полупроводника, такая конструкция позволяет снизить управляющее рабочее напряжение.

На сегодняшний день большинство FinFET изготавливаются методом «сверху вниз», при этом проводящее ребро вытравливается из объёмной плоскости кристалла.

В июне 2022 года концерн Samsung Electronics объявил о начале производства своего нового технологического узла с применением архитектуры транзисторов Gate-All-Around (GAA) – 3 nm на базе технологии Multi-Bridge-Channel FET (MBCFET™) [21].

Уместно обратить внимание на то, что «3 nm» не означает точный размер проводников или транзисторов в этой новой технологии. Здесь «3 nm» выполняет роль одной из частей названия новой технологии. Так же, как и в предыдущих маркетинговых схемах, «3 nm», «5 nm», «7 nm», «14 nm» и т.д. обозначает условный масштаб, характеризующий степень уплотнения комплектов на кристалле – die shrink, а не истинный размер, например, транзисторов и памяти в этой технологии. Упоминание «3 nm» говорит только о том, что данная технология в принципе способна изготавливать конструкции такого размера [22].

Возникает вполне закономерный вопрос: если «3 nm», «5 nm», «7 nm», «14 nm» и т.д. – это лишь некоторые отвлеченные названия, то каковы же реальные размеры компонентов в чипах этих технологий? Ни одна из фирм – производителей чипов не сообщает абсолютно никаких технических подробностей о технологических процессах, в том числе и размеры проводников, транзисторов, памяти и т.д. Однако эти параметры можно оценить, используя публикации сторонних разработчиков.

Так, в статье [23] рассмотрена спецификация технологии «TSMC – 7 nm – CMOS – 2016», которая была обнародована для участников альянса. В частности, в документе «Paper #2.7, 7 nm Platform Technology Featuring 4th Generation FinFET Transistors» сказано, что при использовании литографии EUV с длиной волны UF 13.5 nm расстояние между транзисторами (gate poly pitch) составляет 44/48 nm и шаг металлизации равен 36 nm. В этой же спецификации говорится о том, что ячейка памяти «High-

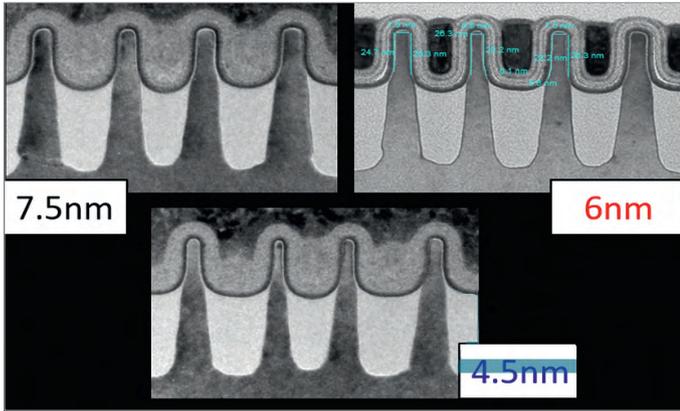


Рис. 3. Фотографии элементов чипов, сделанные с помощью электронного микроскопа [25] «Палантур» для релаксации

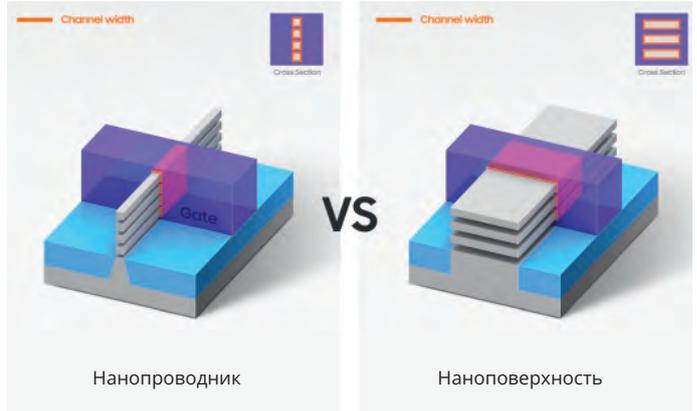


Рис. 4. Схемы двух вариантов нового транзистора Samsung Gate-All-Around [27]

Density 6-T SRAM Cell for Mobile SoC Applications» имеет площадь 0,027 квадратных микрон.

Таким образом, для технологии, которую в данной работе называют коротко «7 нм», транзисторы разнесены между собой на расстояние не меньше 44 нм, а ячейка памяти, в предположении её квадратной формы, имеет размеры 164×164 нм. Сечение ребра транзистора FinFET имеет форму трапеции. Тот факт, что форма ребра отличается от прямоугольной, объясняется проблемами, связанными с ограниченными возможностями современных литографических инструментов, а дальнейшее совершенствование техники оптической литографии чрезвычайно затруднено [24].

Порядок величин размеров транзистора можно получить, используя фотографию, приведённую в цитированной статье, и указанный на ней размер верхней грани трапеции  $W_{fin} = 6$  нм (это ключевой параметр, указываемый в технической документации). Несложные манипуляции позволяют оценить порядок величин высоты трапеции и длины нижней грани, соответственно равными 60 нм и 35 нм.

На рис. 3 показаны фотографии элементов чипов различных технологий, сделанные с помощью электронного микроскопа [25].

На фотографиях, приведённых на рис. 3, показаны сечения рёбер транзисторов FinFET, условные объёмные картинки которых можно видеть на средней схеме рис. 2.

Анализ этих фотографий с использованием данных, приведённых в статье для варианта технологии 6 нм, позволяет оценить размеры верхней грани ( $W_{fin}$ ), высоты и нижней грани, сечения ребра транзистора, соответствен-

но равных 7,6 нм ( $W_{fin}$ ); 100 нм; 39 нм. Аналогичные оценки сделаны в публикации [26].

Проанализированные фотографии вскрытых чипов, сделанные с помощью электронного микроскопа высокого разрешения, позволили оценить размер верхней грани ребра радиатора около  $W_{fin} = 6$  нм. Высота радиатора около 50 нм. В основании радиатора имеет размеры примерно 75×45 нм. Эти оценки хорошо согласуются с выводами работы [27].

Приведённые оценки дают возможность полагать, что современные технологии позволяют изготавливать на кристалле микрокомпоненты с размерами, соответствующими названию спецификации, то есть 3 нм, 5 нм и т.д. Однако истинные размеры транзисторов, памяти, точек вывода могут составлять десятки нанометров.

Возвращаясь к последней разработке Samsung, можно сказать, что основным её преимуществом является то, что новая структура «Gate-All-Around» (GAA), показанная в правой части рис. 2, позволила подключить затвор к полупроводниковому каналу с четырёх сторон. Такая структура, обеспечивающая 360-градусный охват всей площади канала, сводит к минимуму «эффект короткого канала» и дополнительно снижает управляющее рабочее напряжение.

На рис. 4 показаны схемы двух вариантов нового транзистора Samsung Gate-All-Around.

В базовом варианте нового GAA-транзистора, схема которого приведена в левой части рис. 4, полупроводниковый канал имеет форму тонкой и длинной нанопроволоки. Однако малый диаметр нанопроволоки затрудняет получение более высоких значений тока.

Для того чтобы сделать канал как можно шире, чтобы через него мог протекать большой ток, концерн Samsung разработал и запатентовал свой собственный полевой транзистор MBCFET™ (Multi-Bridge Channel Field Effect Transistor). Характерным отличием нового транзистора является то, что у него каналы в виде нанопроволоки заменены на двумерные нанолиты (2-dimensional nanosheets). Нигде в документации Samsung не указывает, какие именно эти нанолиты.

В самом общем определении двумерный однослойный, однокомпонентный нанолит (2D-nanosheets) представляет из себя плоский отрезок кристаллической структуры, состоящий из одного слоя атомов или молекул определённого вещества.

Интерес к этим наноматериалам особенно вырос после открытия графена, который также является нанолитом углерода. Однослойные нанолиты характеризуются толщиной в диапазоне от 0,4 до 5 нм, а самый тонкий нанолит из графена имеет толщину всего 0,335 нм. Эти параметры обуславливают ограничение перемещения электронов внутри нанолитов по вертикальному направлению. Так же, как в случае нанопроволоки, для нанолитов неприемлемы простые законы электромагнитного поля, которые используются для объектов макромира. Электрическое сопротивление, сила тока, генерируемое внешнее поле и другие параметры рассчитываются для нанолитов с использованием элементов физики элементарных частиц.

За последние десятилетия были получены различные варианты двумерных нанолитов, состоящих из слоёв вещества толщиной в один атом или молекулу, таких, например, как дихалькогенид переходного металла

(transition metal dichalcogenide), чёрный фосфор (black phosphorus), дисульфид молибдена (molybdenum disulfide 2D-MoS<sub>2</sub>) и другие.

Двумерные моноэлементные нанолиты обладают хорошей металлической проводимостью и регулируемые электрохимическими свойствами. Например, 2D тетрагональный монослойный TiC характерен высокой динамической стабильностью и анизотропными механическими свойствами. Двумерный монослой нитрида иттрия (t-YN), благодаря уникальным электронным свойствам, может быть успешно использован в электронике [28].

Особый интерес представляют двумерные моноэлементные керамические наноматериалы, полученные на основе объёмного кристалла, известного под общим термином «MAX». Этот класс нанолитов получил название «MAX – Xenes», или сокращённо «MXenes».

В отличие от большинства керамических 2D-нанолитов, MXenes по своей природе обладают хорошей проводимостью и превосходной объёмной ёмкостью, поскольку они представляют собой молекулярные листы, сделанные из карбидов и нитридов металлов, таких, например, как титан. Нанолиты MXenes в настоящее время нашли применение в аккумуляторах, оптоэлектронных устройствах, медицинских диагностических приборах.

Сегодня известны MXenes нанолиты, обладающие уникальными физическими, химическими, электронными и оптическими свойствами, такие, например, как: борофен, силицен, германен, станен, фосфорен, арсенен, антимонен, висмутен и теллуриен.

Крайне интересным представляется то, что класс MXenes нанолитов теоретически может состоять из миллионов возможных комбинаций атомов углерода, азота и таких металлов, как молибден, титан и других. Сложность заключается в том, что среди этих комбинаций лишь некоторые являются устойчивыми. Поэтому для исследователей данных материалов существуют практически неограниченные возможности [29, 30].

Разработка новых материалов для микроэлектроники является крайне важным направлением, обещающим много новых и интересных открытий в ближайшем будущем.

## Квантовые точки

В предыдущих статьях затрагивалась очень тонкая тема о том, где наступает граница между классической физикой, описывающей движение бруска по наклонной плоскости, и квантовой механикой, описывающей волновую функцию движения электронов в атоме [31]. В качестве примера была приведена система из десяти кубитов, которая полностью подчиняется законам современной квантовой механики. Однако для системы из 100, а тем более из 1000 кубитов, классическая теоретическая квантовая механика в некоторых моментах перестаёт работать.

Под термином «квантовая точка» (quantum dot – QD) понимают фрагменты полупроводника с размерами порядка нескольких нанометров, движение электронов в котором ограничено по определённым направлениям электрическими полями. С одной стороны, подобного рода ограничения могут возникать в результате воздействия внешнего электрического поля и использования наноразмерных электродов. С другой стороны, ограничивающие поля могут наблюдаться в случае, когда квантовая точка размещена внутри кристаллической решётки материала с большой запрещённой зоной.

Следует особо подчеркнуть, что квантовая точка – это не отдельные элементарные частицы, а системы, которые могут состоять из десятков и сотен тысяч атомов и молекул. Таким образом, квантовые точки определяют некоторое промежуточное состояние. С одной стороны, это уже не физика микромира в современном её состоянии, а с другой стороны, это ещё и не макромир, где можно пренебречь связями между отдельными частицами.

Таким образом, для описания поведения квантовых точек применяются элементы квантовой механики.

На сегодняшний день разработано большое количество методов моделирования и расчёта структуры квантовых точек. Эти методы можно разделить на две основные группы: теоретические и эмпирические. В одном случае задействуются прямые методы квантовой механики, которые позволяют вычислять такие параметры квантовых точек, как, например: волновые функции электронов и дырок; энергии связи; энергии оптического

перехода для экситонных комплексов и другие аналогичные. Точные решения подобных уравнений невозможны. Поэтому используются упрощённые модели и различные методы аппроксимации, такие как метод сильной связи; функционал плотности (DFT) Кона-Шема, XANES-спектры; функции Грина, программные коды ADF, оптимизация атомной геометрии.

В тех случаях, когда имеется достаточное количество экспериментальных данных, используются эмпирические и полуэмпирические методы.

Моделирование квантовых точек – это отдельная сложная тема, по которой дополнительную информацию можно найти на сайтах [32–34].

Первые квантовые точки в виде микрокристаллов CuCl синтезировал в стеклянных матрицах в 1981 году российский учёный Алексей Екимов. Он экспериментально доказал, что размеры нанокристаллов полупроводников CdS, CdSe, CuCl и CuBr, включённых в структуру стёкол, определяют спектроскопические параметры их поглощения [bit.ly/3X3FbV5](http://bit.ly/3X3FbV5).

В 1984 году американский физик Луи Брюс опубликовал статью о полупроводниковых микрокристаллах в коллоидных растворах, которые позже получили название коллоидных квантовых точек [35].

В тех случаях, когда в качестве материала квантовой точки используется полупроводник, говорят о полупроводниковой квантовой точке. Если нужно подчеркнуть разницу между квантовыми точками на основе проводника и полупроводника, то употребляется термин (semiconductor quantum dot – SQD) [36]. В этой статье будут рассмотрены только вопросы, связанные с полупроводниковыми квантовыми точками, и для их обозначения используется общепринятая аббревиатура QD.

В зависимости от способа изготовления различают два типа – эпитаксиальные и коллоидные квантовые точки.

Эпитаксиальный процесс подразумевает упорядоченный, ориентированный рост монокристаллических слоёв с контролируемой степенью легирования на поверхности кристалла, называемого подложкой.

Существуют различные типы эпитаксии, среди которых наиболее распространены в настоящее время: молекулярно-пучковая эпитаксия; твердофазная эпитаксия; газофазная эпитаксия; осаждение из газовой фазы

фазы; жидкофазная эпитаксия; хлорид-гидридная газофазная эпитаксия.

Большей частью технологии эпитаксии используются для производства полупроводниковых приборов и интегральных схем в тех процессах, где необходимо создание высоколегированных слоёв на слабо легированных подложках или подложках другого типа проводимости. Это отдельная специальная технологическая область, описание которой выходит за рамки темы данной статьи. Поэтому здесь мы больше не будем останавливаться на вопросах эпитаксии. Дополнительную информацию на данную тему можно найти в публикации [37].

С точки зрения современных квантовых точек в основном интересны коллоидные процессы, в результате которых получают коллоидные полупроводниковые нанокристаллы (colloidal semi-conductor nanocrystals). Именно этот тип полупроводниковых нанокристаллов принято называть квантовыми точками (quantum dots – QD).

За последнее время был разработан ряд эффективных методов коллоидного синтеза квантовых точек.

Полученные в результате этих процессов «Colloidal quantum dots» (CQD) представляют собой полупроводниковые кристаллы размером от 2 до 12 нм, покрытые молекулами поверхностно-активного вещества (лиганда), предотвращающего процесс агломерации.

В качестве основы кристаллов квантовых точек могут быть использованы такие вещества, как CdTe, CdS, CdSe, GaInP, InGaAs, ZnSe, ZnS и другие.

На сегодняшний день наиболее широкое распространение получили монодисперсные коллоидные квантовые точки на основе CdSe, CdTe, PbS. Квантовые точки халькогенидов кадмия, например теллурида кадмия, привлекают особое внимание благодаря наличию у них целого ряда уникальных свойств и возможности их применения в нанопотонике, фотовольтанике, нанобиологии и наномедицине.

Структурная схема коллоидной квантовой точки (colloidal quantum dot) показана на рис. 5. На условном изображении коллоидной квантовой точки розовым цветом показано внутреннее ядро, а также внешняя жёлтая оболочка и чёрные линии полимерных лигандных добавок.

Одной из характерных особенностей CQD является то, что они имеют дис-

кретный флуоресцентный спектр, аналогичный тому, который наблюдается для некоторых атомов.

В совместной работе Алексея Екимова и Александра Эфроса, выполненной в Ленинградском ФТИ им. Иоффе, было показано, что нанокристаллы обладают определённым набором квантовых свойств и проявляют себя аналогично «искусственным атомам» [39]. Поведение электрона в квантовой точке можно описать с помощью решения уравнения Шрёдингера для случая движения квантовой частицы в трёхмерной потенциальной яме с непроницаемыми стенками. Полученные при этом параметры, такие, например, как квантование энергии, вырождение энергетических уровней и другие аналогичные характеристики, позволяют с достаточно большой вероятностью моделировать квантовые точки. Структура электронных волновых функций QD во многом напоминает их аналоги для реальных атомов.

Поэтому полупроводниковые квантовые точки часто называют искусственными атомами [40].

Например, если облучать квантовую точку ультрафиолетом (УФ), то электрон в квантовой точке может быть возбуждён до состояния с более высокой энергией и соответственно перейдёт на более высокий энергетический уровень. Для полупроводниковой квантовой точки этот переход означает перенос электрона из валентной зоны в зону проводимости. Состояние в таком виде крайне неустойчиво, и, возвращаясь на прежний уровень, электрон снимает возбуждение, испуская фотон определённой длины волны.

В видимой части спектра цвет этого излучения зависит от разницы энергий между зоной проводимости и валентной зоной. В случае, когда зонная структура в QD чётко не определена, длина волны излучения зависит от интервала между дискретными энергетическими состояниями.

Благодаря эффекту «квантового ограничения» (quantum confinement), возникающего из-за небольшого размера точек, количество выделяемой энергии относительно постоянно для QD с одинаковым размером, что даёт излучение одного цвета. Таким образом, длина волны фотонов, испускаемых QD при снятии возбуждения, зависит от размера самой квантовой точки. Так, например, крупные квантовые точки с размерами около 5 нм испуска-

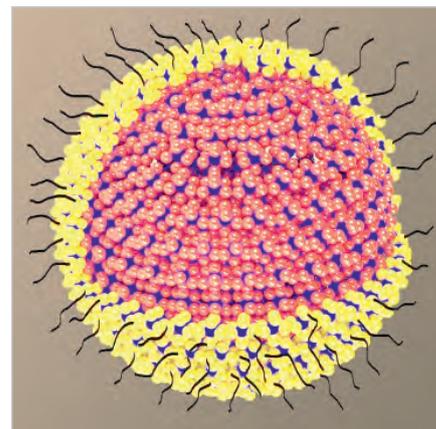


Рис. 5. Структурная схема коллоидной квантовой точки (colloidal quantum dot) [38].

ют красный и оранжевый свет, а точки с размером 2–3 нм излучают более высокоэнергичные фотоны, обеспечивающие цвета в фиолетовой части спектра. Однако следует подчеркнуть, что конкретные цвета излучения QD различаются в зависимости от её точного физико-химического состава.

На рис. 6 показаны спектры излучения коллоидных квантовых точек в зависимости от размера.

С практической точки зрения важно то, что энергетический спектр излучения квантовой точки можно корректировать, варьируя такие параметры, как, например, геометрические размеры, форму, легирование и деформацию. Кроме того, внешние электроды, генерирующие управляющее поле, позволяют менять излучение квантовой точки в реальном масштабе времени. Крайне важно, что квантовые точки обладают очень большим квантовым выходом излучения (> 90%).

Перестраиваемая ширина запрещённой зоны QD позволяет проектировать устройства, предназначенные для работы в определённом диапазоне длин волн.

Особое место среди нанокристаллов занимают флуоресцентные углеродные наноматериалы (fluorescent carbon nanomaterials), которые в 2004 году случайно были открыты в процессе экспериментов с углеродными нанотрубками [42]. Два года спустя в результате целенаправленных экспериментов этот материал был синтезирован и тщательно изучен в лаборатории университета Clemson University, South Carolina, USA. В процессе исследований были обнаружены высокая люминесценция и хорошая растворимость в воде.

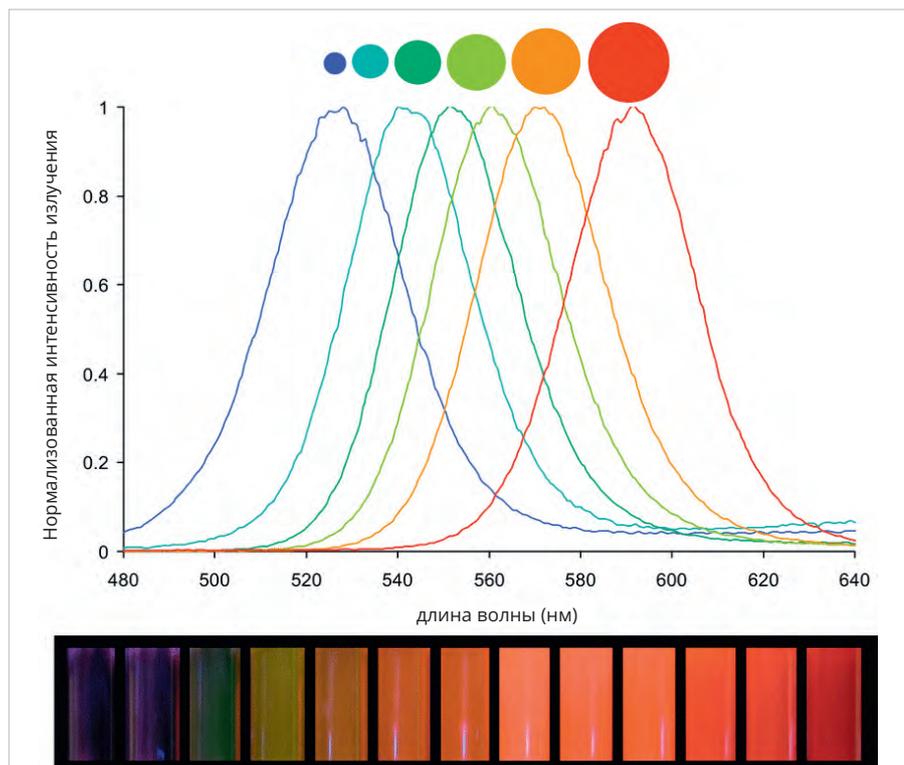


Рис. 6. Спектры излучения коллоидных квантовых точек CdSe в зависимости от размера [41]

Известно, что углерод в своей элементарной форме представляет собой чёрный минерал, который слабо флуоресцирует и плохо растворяется в воде. Несмотря на это, новый материал, который не является полупроводником, авторы назвали в своей публикации «Carbon quantum dots» (CQDs) (углеродные квантовые точки) [43].

Это название укрепилось в англоязычной научной литературе. Однако в ряде случаев аббревиатура «CQD» означает «colloidal quantum dots» – коллоидные квантовые полупроводниковые точки.

Квантовые точки на основе углерода обладают различными свойствами в зависимости от их структуры. В свою очередь, структура CQD определяется технологическими особенностями их изготовления. Процесс производства углеродных квантовых точек проще и дешевле, чем полупроводниковых QD. Функциональные группы, такие как карбоксильные группы на поверхности CQD, обеспечивают биосовместимость и растворимость в воде. Многочисленные биологические, полимерные, органические или неорганические материалы используются для пассивации поверхности и химической модификации CQD. Поверхностная пассивация переносит различные дефекты на поверхность, тем самым улучшая флуоресцентные свойства CQD. Они

обладают стабильной флуоресценцией, проводимостью и высоким квантовым выходом (QY). Нужно отметить, что физика процесса флуоресценции в углеродных квантовых точках отличается от аналогичного процесса в полупроводниковых квантовых точках.

Некоторые типы углеродных квантовых точек по структуре соответствуют наложенным друг на друга листам графена. Эти графеновые квантовые точки, получившие название «Graphene quantum dots» (GQDs), имеют шаг кристаллической решетки около 0,24 нм, что соответствует примерно 100 плоскостным границам решетки графена. Поэтому G-CQD обладают исключительной прочностью, сравнимой и даже превышающей прочность алмазов [43].

Углеродные наноточки CQD могут излучать флуоресценцию в диапазоне от ближнего ультрафиолета (NUF) до ближнего инфракрасного (NIR) диапазона. Благодаря уникальной биосовместимости, растворимости и низкой токсичности CQD представляют огромный интерес, прежде всего, для медицинских, биологических и фармакологических приложений в качестве нанометки различных молекулярных и внутриклеточных процессов.

Кроме того, CQD используются также в электронной, текстильной и пищевой промышленности.

Отметим также, что успешные разработки углеродных квантовых точек проводят и российские учёные. В 2021 году объединённый коллектив учёных из ИТМО, ФТИ им. Иоффе и СОГУ опубликовал результаты своих разработок углеродных наноточек, способных поглощать и испускать свет в инфракрасном спектре. Благодаря уникальным спектральным свойствам эти точки можно эффективно использовать для визуализации различных биологических тканей в живых организмах [44].

Более подробную информацию о свойствах углеродных квантовых точек можно найти на сайтах [45, 46].

Технологии современной коллоидной химии позволяют управлять в процессе производства размерами и внутренней структурой квантовых точек с почти атомной точностью, обеспечивая высокоточный контроль над их физическими свойствами.

При синтезе коллоидных полупроводниковых QD нанокристаллы не осаждаются в виде твёрдого вещества и не остаются растворёнными. При нагреве до определённой температуры образуются сложные структуры, состоящие из нанокристаллов, покрытых монослоем органических молекул, которые выполняют роль стабилизатора.

Современные методы, используемые для изготовления CQD, позволяют синтезировать кристаллы с одинаковыми размерами и однородными свойствами, что крайне важно при массовом производстве комплектующих для радиоэлектронной промышленности.

Существует множество различных методов коллоидного синтеза, в которых в качестве исходного компонента могут быть использованы взвеси мелких твёрдых и жидких частиц в газе или жидкости.

В настоящее время метод горячей инъекции (hot-injection approach) остаётся наиболее распространённым методом синтеза монодисперсных нанокристаллов. Он включает в себя получение гомогенных ядер путём быстрого введения металлоорганических реагентов в горячий растворитель.

Варьируя температуру, концентрацию ПАВ и время реакции, можно получать КТ различных размеров.

Метод нагревания (heat-up method – HU) представляет собой процесс постоянного нагревания вещества-предшественника (precursors) в присутствии лиганда (ligand).

Аналогично методу с горячим впрыском технология HU использует процессы гомогенного зарождения, которые проявляют высокую реакционную способность только при достижении определённой температуры.

Метод нагрева считается более эффективным подходом к получению нанокристаллов, поскольку он позволяет получать QD в одном сосуде без стадии инъекции [47, 48].

Кластерный метод (cluster-assisted method) использует однородные кластеры или затравочные частицы внутри реакционной системы. Они действуют как зародыши и вызывают контролируемый рост нанокристаллов. Реакция обычно инициируется путём объединения известной концентрации небольшого металлоорганического кластера с координирующим растворителем в присутствии полупроводниковых предшественников [49].

Метод синтеза нанокристаллов с использованием СВЧ (microwave-assisted method – МАМ) основан на использовании специальных СВЧ-печей (2,45 ГГц) для мгновенного нагрева прекурсора, обладающего высокой степенью поляризации. В результате возникает активация и зарождение кристаллов [50].

Метод с непрерывным потоком имеет по сравнению с другими улучшенные значения таких параметров, как автоматизация и контроль параметров реакции, эффективность смешивания прекурсоров, масштабируемость. Кроме того, в этой методике можно использовать двухфазный сегментированный поток (газ-жидкость или жидкость-жидкость), ускоряющий диффузионное смешение прекурсоров. Метод с непрерывным потоком на сегодняшний день является оптимальным с точки зрения автоматизированного производства высококачественных нанокристаллов CQD в промышленных масштабах.

Кроме перечисленных методов коллоидной химии для изготовления квантовых точек применяются и другие технологии.

Процессы производства углеродных квантовых точек проще, поскольку целевое вещество углерод можно синтезировать быстро и дешево, сжигая в рабочей смеси любой органический продукт. Например, небольшие углеродсодержащие молекулы, такие как лимонная кислота, глюкоза и саха-

роза, достаточно просто провести через ряд реакций полимеризации и карбонизации, в результате которых образуется CQD.

Другой, более трудоёмкий способ получения CQD использует два этапа. Сначала диспергируются углеродсодержащие макромолекулы, такие как графит, наноалмазы, углеродные нанотрубки, графен и активированный уголь. Затем с помощью известных методов эти взвеси используют для синтеза CQD [51].

Для производства специальных видов QD используются двумерные электронные газы (2DEG), которые обладают уникальным сочетанием таких свойств, как высокая подвижность электронов, сильное спин-орбитальное взаимодействие, малая эффективная масса. Это делает их привлекательной платформой для синтеза различных типов квантовых точек, например, с помощью модифицированного литографического метода [52, 53].

Также нужно отметить ещё один современный метод изготовления квантовых точек, который использует плазменный синтез, позволяющий контролировать размер, форму, поверхность и состав QD [54, 55].

Более подробную информацию о современных методах изготовления квантовых точек можно найти на сайте [56].

Благодаря узкополосному спектрально регулируемому излучению полупроводниковые квантовые точки QD обеспечивают уникальное качество цвета и значительно более широкий охват всего видимого спектра по сравнению с существующими устройствами на стандартных люминофорах. Эти свойства квантовых точек делают их крайне привлекательными в производстве таких устройств следующих поколений, как, например: квантовые светодиоды; дисплеи сверхвысокого разрешения; интегральные фотонные схемы; приборы оптической связи; фотодетекторы и другие аналогичные изделия [57].

В новом поколении светодиодов, получивших название «светодиоды на квантовых точках» (QD-LED), используется основное преимущество QD, которое заключается в том, что при облучении внешним мягким ультрафиолетом они излучают свет в очень узком направленном диапазоне. При этом эффективность высвечива-

ния может превышать 90%. Технология QD-LED позволила создать источники света с параметрами чистоты, глубины цветопередачи, яркости, энергопотребления и эффективности, намного превосходящими светодиоды на основе традиционных люминофоров.

Буквально с первого момента появления квантовых точек крупнейшие производители телевизоров и компьютеров начали разработки дисплеев на базе квантовых точек. В 2011 году Samsung объявил об экспериментальной разработке дисплея с диагональю четыре дюйма на основе квантовых точек, управляемого с помощью активной матрицы. Такая конструкция позволила контролировать каждую QD отдельно [58].

Сегодня высококачественные дисплеи на квантовых точках крупные производители производят уже в коммерческом масштабе. Характеристики этих дисплеев кажутся неправдоподобными. Например, QD-OLED дисплей Samsung 8K UHD имеет разрешение 7680×4320 пикселей и может передавать более миллиона оттенков различных цветов. Правда, и цена у этого чудо-устройства тоже впечатляет: около десяти тысяч долларов США [59].

Не остаются в стороне и другие производители дисплеев. Весной 2022 года SONY объявила о создании своего первого QD-OLED телевизора, сочетающего в себе последние технологические достижения в области квантовых точек и органических светоизлучающих диодов. Заметим, что фирма Sony была одной из первых, изготовивших коммерческие образцы QD-телевизоров в 2013 году, в которых использовались коллоидные квантовые точки, разработанные «QD Vision».

В 2016 году Samsung поглотила «QD Vision» и теперь производит новые панели QD-OLED для Sony [60].

В мае 2022 года в Калифорнии, США, прошла выставка-симпозиум «Display Week 2022», на которой были показаны новейшие образцы AR/VR, OLED, microLED оборудования, телевизоров и носимых устройств на базе QD (рис. 7). На симпозиуме было представлено более 425 технических презентаций от ведущих разработчиков со всего мира. Образцы дисплеев сверхвысокого разрешения и качества, системы машинного обучения для дисплеев, уличные дисплеи больших размеров и миниатюрные дисплеи продемонстрирова-



Рис. 7. На выставке «Display Week 2022» были показаны новейшие образцы AR/VR, OLED, microLED оборудования, телевизоров и носимых устройств на базе QD [61]

ли революционный прогресс в этой области.

Судя по обилию и разнообразию представленных образцов новой продукции, следует ожидать, что в ближайшем будущем видеотехника, использующая технологии QD, постепенно будет вытеснять устройства на базе традиционных люминофоров [62].

Очень интересным является направление, связанное с люминесцентными солнечными концентраторами на квантовых точках (quantum dots luminescent solar concentrators – LSC). Идея LSC заключается в том, что квантовые точки типа  $\text{CuInSe}_2\text{-xSx}$  (CISeS) поглощают солнечное излучение в инфракрасной области и эффективно излучают в процессе флуоресценции в несколько смещённом спектре. При этом реабсорбция составляет незначительную величину.

Этот метод в принципе позволяет превратить стандартные окна или боковые стены дома в энергогенерирующие устройства [63].

Квантовые точки открывают возможность создания принципиально новых устройств фотопреобразования, принцип работы которых основан на уникальных физических процессах, характерных для сверхмалых коллоидных квантовых точек. В качестве примера можно привести размножение носителей, в процессе которого генерируется несколько электронно-дырочных пар из одного поглощённого фотона. Это уникальное свойство используется в разработках новых лазерных устройств медицинского назначения [64].

Благодаря размерам в несколько нанометров, уникальному узкому спектру излучения, очень большому квантовому выходу, а также биологической совместимости углеродные квантовые

точки стали идеальным средством для производства зондов комплексной визуализации химических и биологических процессов на клеточном уровне.

В последние годы флуоресцентная визуализация биологических объектов (bioimaging) приобретает всё большую популярность в медицинских, биологических и фармацевтических исследовательских лабораториях. Эта методика позволяет в реальном масштабе времени изучать процессы в различных химических реакциях, в том числе происходящих в живых организмах.

Современные технологии позволяют синтезировать QD, излучающие в первом (650...950 нм) и втором (1000...1400 нм) окнах ближнего инфракрасного диапазона (NIR), которые обеспечивают высокое качество изображения исследуемых объектов.

Для многоцветной биовизуализации с использованием двух или более длин волн излучения применяются полупроводниковые квантовые точки и углеродные квантовые точки. Эта методика позволяет исследовать многоступенчатые биологические процессы [65].

Среди эффективных методов лечения рака известны два метода, использующие внешнее воздействие на поражённые клетки лучом лазера. Один из методов, фототермическая терапия ФТТ (PTT – photothermal), преобразует лазерный луч в тепло, разрушающее опухолевые клетки. Другой метод, фотодинамическая терапия ФДТ (photodynamic therapy – PDT), использует лазерный свет для генерации активных форм кислорода, которые могут разрушать раковые клетки.

В последнее время появились работы, в которых используются методы ФДТ и ФТТ в совокупности с многоцветной биовизуализацией.

Наноточки можно модифицировать таким образом, чтобы на их поверхности закреплялись светочувствительные молекулы, которые сильно разогреваются под действием флуоресцентного излучения QD. Модифицированные наноточки доставляются в раковые клетки и облучаются ультрафиолетовым светом определённой длины волны, вызывающим, в свою очередь, разогревающий эффект. Аналогичная комбинированная схема применяется и в случае с ФДТ. Подобные исследования проводятся во многих лабораториях мира. Например, в работе [66] использовались модифицированные

графеновые квантовые точки (GQD) для фототермической терапии (PTT).

Ученые из Национального университета Сингапура обнаружили, что агрегированные, фотосенсибилизированные агрегаты наночастиц золота могут успешно использоваться для мультимодальной визуализации и синергетической фототерапии при лечении раковых заболеваний [67].

В современной медицине на первом этапе лечения основной является детальная диагностика, выполняемая с помощью сложнейшего электронного оборудования. Наряду с уже используемыми методами идентификаторы положения и подсвечивающие устройства на базе QD являются необходимыми компонентами диагностического комплекса, работающего в режиме реального времени. На сегодняшний день системы биовизуализации на базе QD, помимо излучающих нанозондов, содержат также сложные электронные системы регистрации и обработки излучения. Эта техника позволяет не только обнаруживать повреждённые клетки в организме человека, но также и доставлять средства лечения непосредственно в клетку (рис. 8).

Оригинальное применение наноточкам нашли разработчики из Технологического института ВВС США (Air Force Institute of Technology). Они разработали краску, содержащую квантовые точки, которые меняют спектр флуоресценции в зависимости от состояния поверхности металла, на который она нанесена. Таким образом, появляется возможность экспресс-анализа состояния деталей самолета с помощью просвечивания его мягким ультрафиолетом [69].

Уникальное свойство исключительной прочности углеродных квантовых точек использовали в своих разработках китайские учёные из Университета Паньжихуа (Panzhuhua University). Они разработали моторное масло для автомобильных двигателей, в которое в качестве присадок добавляли углеродные квантовые точки (CQD) (рис. 9)

Прочные и однородные по размеру CQD, обладающие низкой токсичностью наряду с высокой химической и термической стабильностью, вызывают возрастающий интерес, кроме традиционных электронной и медицинской областях, в таких приложениях, как материаловедение, автомобильный, морской и авиационный транспорт.

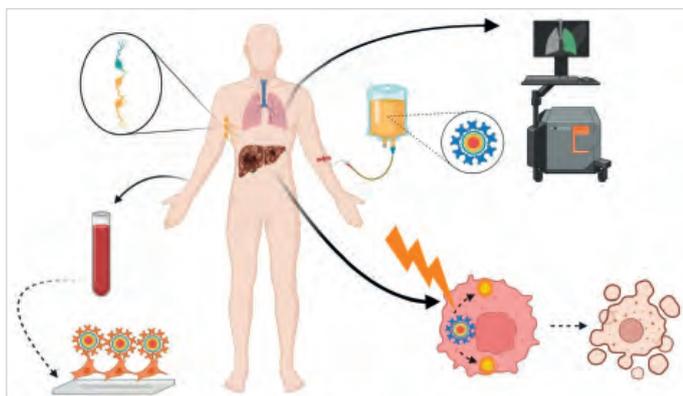


Рис. 8. Современные медицинские системы на базе QD позволяют диагностировать повреждённые органы на молекулярном уровне и доставлять лекарства точно в нужные клетки [68]



Рис. 9. Углеродные квантовые точки можно использовать в качестве присадок в моторных маслах [70]

Крайне перспективное и интересное применение квантовые точки могут найти в электронике следующих поколений, превращаясь при определённых условиях в квантовые транзисторы. Этому направлению будет посвящена вторая часть статьи.

### Литература

- URL: [bit.ly/3YGMPX4](http://bit.ly/3YGMPX4).
- URL: <https://analyticsindiamag.com/tsmcs-3nm-gets-lost-in-the-memory-lane/>.
- URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6982820/>.
- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009261474850311>.
- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038109885800259>.
- URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.445834>.
- URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00683469>.
- URL: <https://www.nature.com/articles/29954>.
- URL: [bit.ly/3lLShJl](http://bit.ly/3lLShJl).
- URL: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.analchem.0c04476#>.
- URL: <https://www.britannica.com/science/carbon-nanotube>.
- URL: <https://nanotube.msu.edu/HSS/2006/1/2006-1.pdf>.
- URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-021-08928-2>.
- URL: <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/8/1257/pdf>.
- URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-10959-7>.
- URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/18/6231>.
- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829722001325>.
- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030222003450>.
- URL: [bit.ly/3lGC74e](http://bit.ly/3lGC74e).
- URL: [bit.ly/415ym8s](http://bit.ly/415ym8s).
- URL: [bit.ly/3lLSkov](http://bit.ly/3lLSkov).
- URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Die\\_shrink](https://en.wikipedia.org/wiki/Die_shrink).
- URL: <https://www.electronicweeky.com/news/business/7nm-processes-iedm-2016-10/>.
- URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-15096-0>.
- URL: [bit.ly/3Xlxd3H](http://bit.ly/3Xlxd3H).
- URL: <https://www.quora.com/How-small-are-computer-transistors>.
- URL: <https://semiconductor.samsung.com/us/newsroom/tech-blog/gaa-dtco-for-ppa/>.
- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1386947721000734>.
- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666675822001230>.
- URL: <https://www.nanowerk.com/mxene.php>.
- URL: [bit.ly/3Yvr5NF](http://bit.ly/3Yvr5NF).
- URL: [http://www.issp.ac.ru/ebooks/disser/Nenashev\\_A\\_V.pdf](http://www.issp.ac.ru/ebooks/disser/Nenashev_A_V.pdf).
- URL: <https://homepage.mi-ras.ru/~msh/download/ppi-2.pdf>.
- URL: <https://apmi.bsu.by/assets/files/levchuk/3-vesti-2017.pdf>.
- URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Louis\\_E.\\_Brus](https://en.wikipedia.org/wiki/Louis_E._Brus).
- URL: [bit.ly/3Rzi4jR](http://bit.ly/3Rzi4jR).
- URL: [bit.ly/3S7HlBV](http://bit.ly/3S7HlBV).
- URL: [bit.ly/3XE0lJt](http://bit.ly/3XE0lJt).
- URL: [bit.ly/3HzuZ0F](http://bit.ly/3HzuZ0F).
- URL: [bit.ly/3DElAw6](http://bit.ly/3DElAw6).
- URL: [bit.ly/3KgVjj8](http://bit.ly/3KgVjj8).
- URL: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja040082h>.
- URL: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja062677d>.
- URL: <https://news.itmo.ru/ru/science/photronics/news/12848/>.
- URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2021.700403/full#B95>.
- URL: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsaeml.1c00783>.
- URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12274-022-4791-7>.
- URL: [bit.ly/3XEb5ra](http://bit.ly/3XEb5ra).
- URL: [bit.ly/3IwSkBQ](http://bit.ly/3IwSkBQ).
- URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527648122.fmatter>.
- URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8705349/>.
- URL: <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.13.041003>.
- URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0126704>.
- URL: <https://www.iasj.net/iasj/download/f7a1428d3d98a607>.
- URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/chapterpub/10.1002/9781119313021.ch6>.
- URL: [bit.ly/40wgGm5](http://bit.ly/40wgGm5).
- URL: [bit.ly/3EaOtHV](http://bit.ly/3EaOtHV).
- URL: [bit.ly/3Iwj05K](http://bit.ly/3Iwj05K).
- URL: [bit.ly/3xz7qAk](http://bit.ly/3xz7qAk).
- URL: <https://sid.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/msid.1306>.
- URL: [bit.ly/3Z1DUPH](http://bit.ly/3Z1DUPH).
- URL: [bit.ly/3S42KMz](http://bit.ly/3S42KMz).
- URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenerylett.2c00781>.
- URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aax3489>.
- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001868619302969?via%3Dihub>.
- URL: [bit.ly/3k5kHxC](http://bit.ly/3k5kHxC).
- URL: [bit.ly/3EgM7aB](http://bit.ly/3EgM7aB).
- URL: <https://www.dovepress.com/getfile.php?fileID=80458>.
- URL: <https://spectrum.ieee.org/quantum-dot-paint-could-make-airframe-inspection-quick-and-easy>.
- URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-021-06032-8>.

# Инновации устройств IoT, беспилотных моделей в проблематике безопасности обмена данными. Обзор

Галина Морозоватая

По прогнозам аналитической компании IDC, в 2025 году количество пользователей Интернета вещей превысит численность населения планеты Земля на 80 миллиардов подключённых устройств. Большая часть пользователей применяет их в быту; варианты новейших устройств бесконечно разнообразны: позволяют не только прогнозировать сны, дистанционно управлять процессами жизнедеятельности человека, но даже отслеживать температуру тела коровы в хлеву фермера. Воплощённые инновационные идеи сокращают затраты времени на контроль параметров, однако по тем же причинам возникает проблема безопасности, рисков утечки конфиденциальной информации через протоколы обмена данными. В статье рассматриваются варианты аутентификации IoT в интеллектуальной сетевой архитектуре и авторизации (разрешения взаимодействия) для повышения информационной безопасности.

## Интернет вещей и не только

Термин «Интернет вещей» (Internet of Things, IoT) означает совокупность объектов с электронным приводом и адаптером, подключённых к Интернету и обменивающихся цифровыми данными; впервые был использован в 1985 году. В наше время Интернет вещей представляет собой инструментарий, программируемый посредством приложений с возможностью передачи данных не только через Интернет, но и через другие сети, включая «домашние»: локальные и даже нейросети, как частный случай методов распознавания образов,

дискриминантного анализа. Между тем обучение нейронных сетей – это многопараметрическая задача нелинейной оптимизации и перспективное направление в структурном подходе (моделировании) естественного интеллекта с помощью компьютерных алгоритмов. Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. На рис. 1 представлен схематичный вид «ежедневных» взаимосвязанных объектов в системе «Умный дом».



Рис. 1. Схематичный вид «ежедневных» взаимосвязанных объектов в системе «Умный дом»

По доступной статистике, на конец 2022 года в мире насчитывается более 20 млрд устройств IoT. Оборудование поистине разностороннее: датчики, в том числе окружающей среды, приводы, гаджеты, устройства или машины, встроенные в мобильные устройства, промышленное оборудование для разных сфер высокотехнологичной деятельности, включая медицинскую. Популяция устройств IoT, где буквально сталкиваются физический и цифровой миры, экспоненциально растет. Устройства IoT созданы для обмена информацией, они повышают производительность труда и уровень комфорта в жизни. Из-за разнообразия системно интегрированных в сеть электронных устройств, их различных возможностей, мест и способов развёртывания возникает проблема безопасности сохранности данных, включая персональные. В то же время с развитием НТП совершенствуется переоценка биологической активности человеческого мозга. Несмотря на совершенствование интегральных технологий, искусственный интеллект (ИИ) пока не способен решать нелинейные и неформализованные задачи сопоставимо с человеком. Мозг человека и некоторых животных во многих случаях работает в разы эффективнее. Причина в качественных архитектурных различиях между электронным процессором и мозгом живых существ, при этом такое объяснение опирается на не изученные в полной мере возможности передачи информации в мозгу. Так или иначе, готового эффективного решения для создания идеальной искусственной нейронной сети всё ещё нет [2]. В той же публикации для сведения представлена структура искусственного нейрона.

В 2022 году московский студент написал и защитил диплом с помощью нейросети. Этот факт пока не означает, что типичная система высшего образования однозначно несостоятельна, но сие способствует модернизации цифровых технологий в образовательной

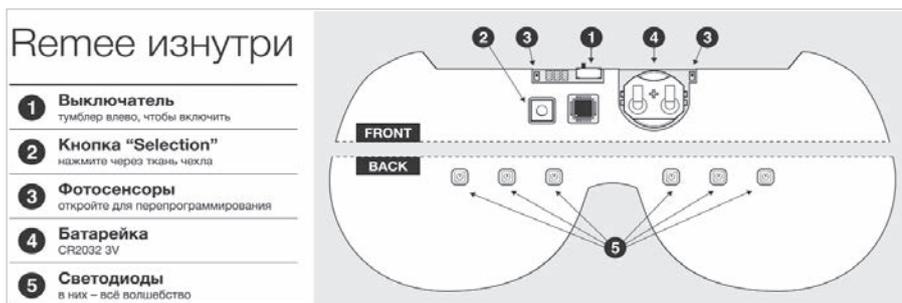


Рис. 2. Схематичная иллюстрация электронного устройства Remee – маски «Палантир» для релаксации

среде и инициирует исследования в области алгоритмов взаимодействия с нейросетью. Всё-таки много фактов свидетельствует о том, что за нейросетями будущее. Неслучайно ещё в октябре 2019 года президентом России принята «Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года».

### Современное состояние и перспективы сетей

Предметы повседневного обихода в системе IoT, такие как «умные розетки», элементы освещения, замки, датчики движения, подключаются к глобальной сети и создают большой массив данных в объёмах, сопоставимых с сотнями гигабайт, притом что 1 ЗБ эквивалентен 1 млрд ТБ или одному триллиону гигабайт. Только 1% данных, генерируемых при подключении к IoT, используется для обучения или прогнозирования [2]. Отсюда можно сделать три основополагающих вывода: есть большие перспективы развития направления, дальнейшего совершенствования ИИ, возможно появление ещё большего количества сетей на основе IoT, существует проблема утечек данных при несанкционированном доступе в сеть. Можно ли заявить об этом, как о новостной проблематике? Вряд ли. Интернет-сайты давно собирают сведения о пользователях посредством фиксации запросов и генерации файлов cookie. Ведущие компании – производители оборудования (к примеру, Samsung) собирают и анализируют агрегированные данные об интересах и предпочтениях пользователей смарт-телевизоров, затем ориентируются на них при разработке приложений, наполнении контентом своих сервисов, размещении рекламы, выбирая при этом лучшее время суток для её восприятия. К примеру, Fitbit, анализируя данные в облачном хранилище, полученные от браслета, знает, сколько и как тренируется пользователь оборудования, каков режим сна и

состояние здоровья – всё это предполагает возможности опосредованного влияния. По сути, речь идёт об анализе не только предпочтений и состояния физического здоровья, но и мыслей клиентов, то есть об определённом уровне контроля над ними или, по крайней мере, попытках установления такого контроля.

### Элементы нейросети и майнд-машин, интегрированные в IoT

Мозг человека считается одним из наименее изученных органов, загадочная и непредсказуемая деятельность которого способна удивлять даже светлые умы планеты. Когда с развитием НТП и открытием магнитно-резонансной томографии появились новые возможности для изучения функциональности мозга, активности отдельных участков при выполнении разного вида деятельности, были разработаны совершенно уникальные электронные приборы по стимуляции мозга.

Использование приборов стимуляции мозга теперь применяют не только в медицинских целях, но и в качестве несертифицированных электронных устройств-помощников – в быту. В Москве магазин, реализующий «майнд-машины», постоянно работает с 2006 года и по сей день. Типичные примеры таких девайсов представлены ниже. Это направление связано с «киборгизацией» – разработкой и внедрением в жизнь людей новой технической реальности, включающей создание и функционирование кибернетических организмов и роботов-антропидов с элементами ИИ. На основе изучения нейросетей предполагается улучшать память и способность к обучению, бороться с вредными привычками, бессонницей, поднимать настроение, делать отдых более качественным.

Прибор для осознанных сновидений представляется маской из мягких материалов, которая одевается на



Рис. 3. Внешний вид устройства «Доктор ТЭС-03» для транскраниальной электростимуляции мозга

глаза перед сном. Конструктивная схема устройства представлена на рис. 2. Прежде всего, это электронная система личностного развития и релаксации, предназначенная для самопознания и самосовершенствования, модели которой могут быть интегрированы в IoT. Данный тип электронных устройств не относится к медицинским приборам. Лечебно-восстановительные эффекты проявляются опосредованно, через активацию центральных нервных механизмов, регулирующих вегетативные функции, психическую и двигательную активности, эмоции и поведение через повышение неспецифической резистентности организма. Встроенный внутри маски электронный процессор имеет датчики, реагирующие на движение глаз в фазе быстрого сна, сигнализирующее о начале сновидений. Производитель сообщает, что полёт ваших фантазий и желаний не имеет границ. Вы можете реализовать все свои несбыточные мечты: полететь на Луну, поддержать за руку известную личность, избавиться от страха высоты, стоя на краю пропасти, одним словом, делать всё, что невозможно в реальной жизни [3]. Маска «Палантир» предназначена для медитации с открытыми глазами. Помогает концентрации зрения и обеспечивает спокойный сон – вплоть до глубокой медитации и ауто-психокоррекции [5].

Устройство «Доктор ТЭС-03», представленное на рис. 3, – прибор для



Рис. 4. Электронное устройство DreamStalker Ultra

транскраниальной электростимуляции мозга. Частота тревожных сновидений линейно и статистически связана с риском снижения когнитивного восприятия среди взрослых и людей среднего возраста, а также с риском деменции. Причём деменция – не первое заболевание, на которое могут указывать кошмарные сновидения. Связь тревожных снов с болезнью Паркинсона установлена давно. Приблизительно 5% взрослых испытывают кошмары еженедельно, а еще 12–40% ежемесячно. Эффект устройства основан на взаимодействии нейронов (мозга) под воздействием слабой стимуляции электрическим током. Разработчики предложили решение в виде нейроинтерфейсов (интерфейс «мозг–компьютер») – происходит обмен информацией между мозгом и внешним устройством: ПК, смартфоном, экзоскелетом, бытовыми приборами, инвалидной коляской или даже искусственными органами чувств. Все эти устройства конфигурируются в системе IoT.

Ночной сон человека делится на циклы длительностью примерно 90 минут каждый. Каждый цикл подразделяется на фазы. В первом цикле сна фаза со сновидениями длится всего несколько минут. С каждым последующим циклом её длительность возрастает. Длительность глубокого БДГ-сна, наоборот, уменьшается с каждым циклом. Программируя последовательность бесконтактного воздействия на нейроны мозга, можно регулировать продолжительность сна и влиять на сновидения. Подробнее об этом изложено в [3].

По мере старения организма относительная доля глубокого сна и сна со сновидениями уменьшается. Так, воз-

растные изменения приводят к появлению чувства «недосыпания» и сонливости в дневное время. В улучшении самочувствия может помочь «генератор сна» с оригинальным музыкальным сопровождением (посредством стереонаушников) по технологии бинауральных ритмов и фазированного «розового шума». Технология аудиовизуальной стимуляции помогает контролировать психоэмоциональное состояние без медикаментов, без воздействия посторонних установок и внушений и без формирования зависимости. Таковы технические средства с условно новыми возможностями, значительно расширившимися с интеграцией в систему IoT.

Устройства полезны для улучшения памяти и интеллектуальных функций, повышения физической и умственной работоспособности, для активизации процессов обучения и творческих возможностей, коррекции психоэмоциональных состояний. Кроме того, помогают при реабилитации после тяжелых физических и эмоциональных нагрузок, коррекции психофизиологических состояний в спорте, нивелировании эффекта дисинхронизации при перелётах в другой часовой пояс. Опытные пользователи рекомендуют перед применением электронных приборов для релаксации на основе звуковых и световых эффектов, какими являются майнд-устройства, естественным образом выспаться в течение 4-5 часов, а затем применять девайс. Внешний вид устройства DreamStalker Ultra для осознанных сновидений представлен на рис. 4.

Аналоговые сигналы с датчика поступают на интегрированный АЦП микроконтроллера с разрядностью

12 бит. Увеличение разрядности АЦП даёт возможность более точно отслеживать малейшие изменения сигнала на входе, то есть качественно реагировать на состояние пользователя. Устройство имеет встроенный модуль Wi-Fi, работающий в режиме точки доступа. Управление настройками и функциями производится через интернет-браузер. Если сравнительно недавно аудио- и видеотехнологии использовались для создания информационно-развлекательных систем, то теперь разработчики РЭА уделяют внимание интерфейсам «человек–машина» и системам безопасности.

### Проблемы безопасности сетей и связи самоуправляемых транспортных средств

Самоуправляемые транспортные средства – ещё одна область, реализация которой потребует совершенствования сетей связи нового поколения 5G и 6G. Электромобили оснащаются сенсорами, считывающими многофакторную информацию, в том числе о дорожной обстановке: ближайших транспортных средствах, погодных условиях, состоянии асфальта, дорожных знаках и др. Так, на новых автомобилях Tesla Motors устанавливаются не менее 8 видеокamer, обеспечивающих обзор 360° на дистанции до 250 метров, и не менее 12 усовершенствованных ультразвуковых датчиков, определяющих объекты вокруг электромобиля и расстояния до них. Раньше та же фирма задействовала «автопилот», который «умел работать» при участии человека. Теперь на основе полученных данных управление поездкой можно осуществлять в автоматическом режиме. Создание полноценного беспилотного автомобиля, в том числе грузового, – один из самых захватывающих вызовов технологической мысли начала XXI века по всему миру.

В США появилась перспектива массового производства дорожных «беспилотников», которые могут обмениваться информацией друг с другом, с объектами дорожной инфраструктуры, их системы не обособлены. «Открытость» системы делает беспилотные электромобили уязвимыми для перехвата управления – та же проблема, что и в сетях IoT, но на ином уровне. В 2015 году через Интернет хакер вошел в систему управления автомобилем Jeep Cherokee и попытался управ-



Рис. 5. Беспилотный электромобиль фирмы Loxo



Рис. 6. Вид электрокара с открытым кузовным отсеком

лять им. После этого система обмена информацией, получившая название V2V (англ. «vehicle-to-vehicle» – «от средства к средству»), и её связь с GPS были усовершенствованы. Ещё 10 февраля 2016 года национальное управление по безопасности движения на автострадах США (англоязычная аббревиатура NHTSA) сообщило, что с точки зрения закона компьютер, управляющий автомобилем вместо человека, может считаться водителем [6]. Разумеется, это значительный шаг вперед в правовом поле и юридический прецедент.

А пока на дорогах Швейцарии представлен первый в Европе коммерческий беспилотник для доставки товаров из магазинов и почты. Он уже появился на дорогах и проходит испытания, но пока не сертифицирован. Внешний вид транспортного средства без водителя представлен на рис. 5.

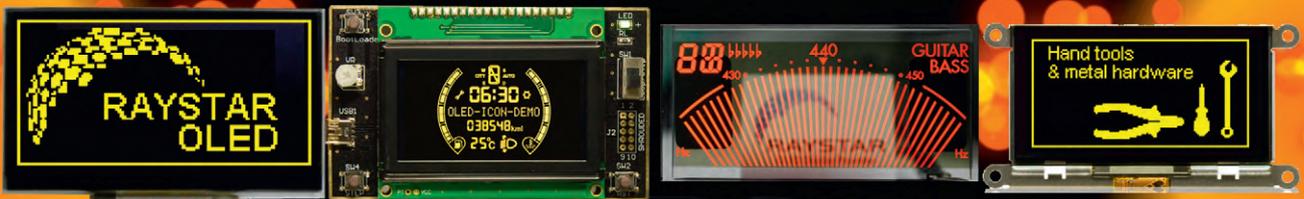
Автономный шаттл интегрируется в IT-инфраструктуру компании-ритейлера, предлагает трансформируемый грузовой отсек и по габаритам подходит для разных задач. Конструкция реализована на дюралюминиевой платформе-скейтборде, оснащённой четырьмя

ступичными электромоторами; без подзарядки проезжает до 110 километров. Самый быстрый дорожный «беспилотник» в Швейцарии способен одновременно доставлять 64 посылки общей массой 320 килограммов. Причём минимальная погрузочная высота в 0,4 метра облегчает доступ к отсеку для людей в инвалидных колясках [5]. Вместо датчиков-сенсоров с вращающейся частью электрокар использует комбинацию из радара, лидара, сонара, камеры и вычислительного алгоритма. Это даёт обзор 360° как шаттлу, так и дистанционно присматривающему за



### Лучшая замена ЖК-панелям

### OLED-дисплей Raystar



Специсполнение по ТЗ заказчика

Прозрачные модели

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

#### Характеристики

- Яркость экрана до 150 кд/м<sup>2</sup> обеспечивает считывание изображения при ярком солнечном свете
- Высокая контрастность 2000:1
- 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



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

(495) 232-2522 • INFO@PROCHIP.RU • WWW.PROCHIP.RU



Рис. 6

## Защита данных и аспекты безопасности конфигурации IoT

Если говорить об IoT даже небольшой домашней сети, создающей коллекцию устройств многоцелевой среды, задействованы принтеры, цифровые видеорегистраторы, IP-камеры и другие бытовые электронные устройства, в том числе с конфигурацией B2B. Рассмотрим потенциальные риски, связанные с управлением безопасностью устройств IoT. Защитник устройств AWS IoT упрощает аудит конфигураций, аутентификацию устройств, обнаружение аномалий и получение предупреждений для обеспечения стабильной работы. Поскольку устройства IoT подключены к глобальной сети, их можно «взломать», как и любое устройство с доступом к сети Интернет. Производители выпускают большое количество устройств IoT, чтобы не отставать от спроса, а безопасность продукта представляется второстепенной, заботой пользователя на манер сентенции «спасение утопающих – дело рук самих утопающих». В обиход введён специальный термин – «концентрация атаки», как сумма различных факторов, когда неавторизованный пользователь может получить доступ к данным. С одной стороны, минимум подключённых к IoT электронных устройств способствует их безопасности, и наоборот, увеличение количества устройств IoT означает, что риски несанкционированного доступа к информации расширяются с каждым новым устройством, подключённым к Интернету. Электронные устройства собирают и записывают в память, в том числе облачную, конфиденциальные данные, сохраняют доступ и обмениваются данными в потоковом режиме. По условной аналогии со сбором файлов cookie в Интернете получивший доступ к массивам имеет возможность «ознакомиться» со всем происходящим в офисе или доме. К примеру, доступ к принтеру позволит просмотреть всё, что было «отправлено на печать» или отсканировано в течение длительного времени. Сегодня для интернет-трафика популярен условно передовой протокол обмена данных IPv6, предлагающий пул 128-битных адресов для назначения устройствам. Это настолько огромный массив данных, что каждому атому на поверхности планеты Земля можно присвоить уникальный адрес, и притом останет-



Рис. 7. Иллюстрация полностью управляемого автономного режима электромобиля

ним оператору. Грузовой отсек «беспилотника» легко трансформировать под конкретные задачи. На внешнюю панель кузова выведены кнопки экстренной остановки (блокировки), которые важны на случай нештатных ситуаций. Такие шаттлы были замечены в конце 2022 года также в Эстонии.

Один из крупнейших разработчиков графических ускорителей и процессоров компания NVIDIA Corporation продемонстрировала возможности открытой платформы Driveworks Alpha 1 для беспилотных машин [6]. Платформа Driveworks Alpha 1 – это аппаратное и программное решение для разработчиков с целью конфигурирования сопутствующей РЭА для беспилотных ТС для качественного ориентирования на дороге и сверхбыстрого реагирования на изменение дорожной ситуации, причём ПО намерены обновлять каждые 2 месяца. Этим шагом, кроме совершенствования ПО, также достигается цель обеспечения защиты от несанкционированного дистанционного проникновения в систему связи шаттла и «центра». На основе перспективного решения разрабатываются автомобили Baidu, nuTonomy, Volvo, TomTom и даже автобусы WEpods. Основное же направление пока «грузовое»: доставка малогабаритных заказов из магазина, служб доставки, почты. На рис. 6 представлен вид электрокара с открытым кузовным отсеком.

### Уязвимость интерфейса внешнего доступа

Тем не менее уязвимыми пока являются не только беспилотные гибридные и электромобили, но и традиционные автомобили с беспроводным

интерфейсом доступа к ДВС (в том числе через OBD-порт). Безопасность протоколов коммуникаций встроенного оборудования является актуальной проблемой как для разработчиков из России, так и для зарубежных. Многие из подобных транспортных средств используют аппаратное обеспечение: камеры, радары и лидарные датчики, способные поддерживать полностью автономное вождение. На рис. 7 представлена иллюстрация человека в кабине электромобиля, который «отдыхает» от управления.

Хотя прогноз обещает быстрый прирост числа автономных ТС, пока продажи беспилотных автомобилей остаются крайне низкими. Повсеместно ещё не приняты нормативные акты, позволяющие легально эксплуатировать автономные транспортные средства. Логично, что производители не готовы вкладывать большие средства в разработку моделей, которые не могут в обозримом будущем выйти на рынок. Ещё одним ограничивающим фактором является стоимость сенсорного оборудования. К 2026 году стоимость датчиков, необходимых для обеспечения автономного вождения, станет на 25% ниже, чем в 2022 году. Но и при таком снижении цена останется относительно высокой. Это означает, что в текущем десятилетии автономные функции будут доступны для автомобилей премиум-класса и транспортных средств, принадлежащих крупным автопаркам [6]. Так или иначе, проблемы безопасности в сетях связи и управления, будь то IoT или шифрованный сигнал для электромобиля с использованием GPS и сотовой связи, имеют общее начало.

ся 99% её неиспользованных возможностей. Пока всё работает, такая взаимосвязанность удобна. Но каждое из устройств является «точкой» входа в корпоративную сеть и потому – рискованный фактор. Несмотря на то что обработка данных в конфигурации IoT подпадает под действие «Общего регламента по защите данных» (GDPR), большинство производителей устройств IoT не продают продукты с высоким уровнем безопасности в формате «конфиденциальность по умолчанию», а ориентируются, прежде всего, на доступную и востребованную среду – «ширпотреб». За последние годы, по статистике, использование IoT-устройств в DDoS-атаках не уменьшается. На этом фоне «недостижимого Монблана» существуют решения для формирования стратегии безопасности данных IoT. Предлагается объединить IT-инфраструктуру (распределённую, неизменяемую или эфемерную конфигурацию) в единую частную сеть с тем, чтобы обеспечить безопасную связь между развёрнутыми устройствами IoT и инфраструктурой, которая контролирует (аккумулирует и хранит) полученные данные. Один

из таких вариантов – OpenVPN Business VPN, Access Server в качестве решения для обеспечения безопасности Интернета вещей [1].

### Риски IoT и сетей на их основе

Ещё одна проблема безопасности данных связана с уязвимостью беспроводного доступа через Bluetooth без проверки криптографических подписей на прошивке и на устройстве. Хакерам достаточно найти или получить данные для входа в учётную запись в Интернете. Если удастся проникнуть в сеть и получить доступ к одному из её элементов (устройств), то злоумышленник получает доступ ко всем устройствам сети. Используя учётные данные, пройдя аутентификацию в сети, можно считывать видео с камер видеонаблюдения и получать доступ к сохранённым записям любого из клиентов в системе. В том числе осуществить несанкционированное изъятие персональных данных пользователей или организаций, переместив массив в облачное хранилище или на сервер, зарегистрированный даже в другом государстве. Закрыть же доступ к сети

при попытках завладеть данными или DDoS-атаках с дефектом RCE OMIGOD не всегда возможно оперативно.

Методики защиты данных в IoT предполагают изменение (администрирование) учётных записей. Ещё в 2018 были известны случаи, когда линейка маршрутизаторов D-Link поставлялась с закодированными учётными данными по умолчанию; зная это и обладая достаточной компетенцией, можно изменить прошивку и извлекать затем конфиденциальные данные из потока информации. Большинству устройств бытового назначения в системе IoT недостаёт сложности учётных данных по умолчанию, шифрования, двухфакторной аутентификации и надёжного восстановления пароля. Эти уязвимости в системе безопасности могут привести к тому, что хакеры получают лёгкий доступ к устройствам и корпоративным сетям – ситуация с повышенным риском, поскольку даже анонимный пользователь имеет возможность запустить JavaScript в пользовательской среде и выполнить произвольные команды в ОС маршрутизатора. Отсюда понятна необходимость регулярной смены



 **ЭЛЕКТРОНИКА ТРАНСПОРТ 2023**

16-я специализированная выставка электроники и информационных технологий для пассажирского транспорта и транспортной инфраструктуры

Проводится в рамках Российской недели общественного транспорта и городской мобильности [www.publictransportweek.ru](http://www.publictransportweek.ru)

**27-29 СЕНТЯБРЯ / МОСКВА / ЦВК ЭКСПОЦЕНТР**



[WWW.E-TRANSPORT.RU](http://WWW.E-TRANSPORT.RU)

Реклама

аутентификационных данных пользователем сети. Упрощённые программные проверки безопасности при входящих соединениях – ещё один рискованный фактор. Устройства, которые когда-то были безопасными, с развитием технологий становятся полностью уязвимыми для кибератак и утечек данных.

Отсутствие аутентификации при каждом доступе даёт преимущества потенциальным злоумышленникам, действующим в режиме активного мониторинга сети. Вместо этого необходима тройная аутентификация: кодирование сертификатов в обновлении прошивки и с функцией обновления ПО системы безопасности. С одной стороны, обновление является рискованным фактором, который пользователь не контролирует: мало ли куда могут уходить данные при активации нового обновления, но, с другой стороны, встроенные средства управления мобильными приложениями и защиты от вредоносного ПО предполагают поддержку производителя ПО с аналитикой в дистанционном формате угроз в режиме реального времени, а это мотивирующий экономический фактор для производителя, ибо он не заинтересован терять клиентов–потребителей. Таким образом, при отсутствии иных, лучших возможностей контроля трафика и рисков факторов кражи данных уместно доверить это производителю ПО. А также озаботиться регулярной сменой оборудования раз в 2-3 года. А пока по статистике 5-6 наборов паролей позволяют онлайн-злоумышленникам получить доступ к 10% подключенных устройств IoT. 15% пользователей не меняют пароли устройств по умолчанию, отчего стал реальным сценарий, когда злоумышленник, оставаясь неизвестным, дистанционно через сеть управляет климат-контролем в офисе. В такой ситуации остаётся только радикальный выход: отключить конкретное устройство как от IoT сети, так и от питания электросети 230...240 В.

## Проблемные вопросы интерфейса

Для улучшения кибербезопасности специалисты (OWASP) не рекомендуют применять устройства IoT без функции изменения «пароля по умолчанию». Даже если устройство не позволяет изменить пароль (Amazon Alexa, Google Hub), возможным реше-

нием станет усиление безопасности в точке подключения (маршрутизатор, модем). Используйте самый длинный пароль или парольную фразу, разрешённую системой паролей. С помощью мнемоники для запоминания сложных паролей применяют самые длинные из возможных паролей. К примеру, в «Книге рекордов Гиннесса» зарегистрировано самое длинное слово на финском языке – *lentokone esuikhkurturbiinimoottoriarumekaanicooliupseerioppilas*, означающее ученика-помощника младшего офицера-механика по турбинам реактивных самолетов в силах обороны Финляндии. Почему бы не использовать нечто по аналогии? Если устройство не шифрует сообщения при отправке по сети к облачным службам, а при трансляции данных через Wi-Fi запускает HTTP-сервер (для приёма учётных данных в сеть), соединение посредством VPN улучшает безопасность. VPN с шифрованием трафика данных позволяют устанавливать безопасные удалённые сетевые подключения из любого места. Тогда авторизованные устройства IoT становятся безопасным элементом частной сети.

Выбор правильного протокола безопасности аутентификации и авторизации зависит от протокола связи, который сеть использует для идентификации ПК и защиты данных. Из основных известны три типа протоколов безопасности данных в системе IoT: распределённый односторонний, распределённый двухсторонней связи и централизованный по трёхстороннему подключению. Первый – для соединений между устройствами, которым требуется безопасность, но не постоянный мониторинг; как следует из названия, только одна сторона аутентифицирует себя для другой; способствует авторизации с помощью сохранённых сертификатов и удостоверений. Второй метод взаимной связи для коммерческой передачи конфиденциальных данных требует, чтобы устройства аутентифицировали друг друга посредством цифрового идентификатора перед обменом данными. Третий протокол – централизованное трёхстороннее подключение – устраняет задержку аутентификации за счёт регистрации устройств на центральном сервере; подходит для постоянно подключённых устройств или устройств доступа по требованию. Тут используется централизованный сервер или доверенное стороннее прило-

жение, которое распространяет сертификаты аутентификации устройств IoT и управляет ими.

Большинство современных IoT-устройств обновляют ПО прошивки автоматически посредством беспроводных OTA-технологий. Это очень удобно, но одновременно является рискованным фактором безопасности сети. Чтобы уменьшить его влияние, рекомендуется осуществить резервное копирование устройств IoT перед обновлениями, предусмотрев процедуру восстановления в случае сбоя обновления. Наряду с отсутствием аутентификации и авторизации, слабым шифрованием и фильтрацией входных и выходных данных небезопасные сетевые службы являются проблемой как для предприятий, так и для частных сетей. Типичные и известные способы несанкционированного входа в сеть подразделяются:

- на Wardriving – поиск сетей Wi-Fi, в том числе дистанционно из припаркованного автомобиля, с ноутбука или мобильного устройства;
- Evil Twin Attacks – открытые точки доступа Wi-Fi, созданные хакером для доступа к сообщениям пользователей;
- Wireless Sniffing – использование программного или аппаратного обеспечения для прослушивания сообщений, передаваемых по беспроводной сети.

Из простых решений для противодействия несанкционированному доступу в сеть рекомендованы: ограничение доступа к сети для авторизованных пользователей путём фильтрации адресов управления доступом к среде (MAC); сокрытие уникального «имени» идентификатора набора услуг (SSID); применение двойного брандмауэра: один в беспроводной сети (на основе маршрутизатора или модема), второй на беспроводных устройствах (на основе хоста) практикуют для дополнительной защиты трафика и данных. Интерфейсы, конфигурированные в IoT: веб-интерфейс, серверный API, облачное хранилище данных, мобильное устройство взаимодействуют. При обнаружении проблемы уязвимости в одном элементе системы она подвергается опасности целиком. Отсюда важно регулярное обновление ПО точки доступа.

## Выводы. Перспективы сетей с IoT

Сфера продуктов, подключаемых к Интернету в режиме реального времени, будет значительно расширена в ближайшие годы. На промышленном уровне для снижения издержек внедряются интеллектуальные системы обеспечения жизнеобеспечения: освещения и регулирования мощности отопления, вентиляции, кондиционирования и охлаждения воздуха (ОВКВ). Подключённые в сеть камеры В2В для наблюдения в офисах, «умные замки», конфигурированные в СКУД с выходом на облачное хранилище, и многие другие при каждом подключении получают собственный IPv6-адрес. Но есть слабые стороны IoT, которые рекомендуется учитывать. Утечки данных, атаки программ-вымогателей и другие угрозы безопасности – ожидающая нас печальная действительность, если не подготовиться и не принять превентивных мер. Усиление защиты устройства – не один шаг или действие, а процесс. Процесс многофакторной защиты устройств уменьшает уязвимости, которые могут использовать хакеры на уровнях хоста, приложения, операционной системы и пользователя, причём каждый уровень требует уникального метода безопасности. Важен эффективный механизм идентификации устройства, когда серверы с помощью аутентификации отличают действующую точку IP- и MAC-адресов от несанкционированного. Уникальный идентификатор каждого устройства IoT позволяет отслеживать его постоянно для защиты сети. Так, можно удалённо проверить устройство, используя инфраструктуру открытого ключа (PKI), связать устройства с сертификатами «открытого ключа» от центров сертификации. Другими мерами являются управление паролями, использование нестандартных конфигураций, а также обновление прошивки и исправлений с отключением ненужных протоколов, служб и портов. Подкреплённые аутентификацией, авторизацией с защищёнными протоколами для устройств и маршрутизацией, такие методы снижают риски несанкционированной потери данных в нейросетях и, в частности, в IoT. Среди ключевых IT-трендов 2023 года переход к платформенным решениям: от идеологии импортозамещения IT-продуктов к формированию отечественной платформы, замещающей импортное ПО. Нарботанный опыт

интеграции продуктов в единую систему позволяет двигаться в направлении к технологическому суверенитету.

## Литература

1. Уязвимость IoT для кибербезопасности. URL: <https://openvpn.net/blog/iot-device-vulnerability/>.
2. *Сведе-Швец В.Н.* Разработка 3D фотон-электронной матричной нейросетевой реконфигурируемой платформы для высокопроизводительной обработки информации. URL: <https://www.soel.ru/online/razrabotka-3d-foton-elektronnoy-matrichnoy-neyrosetevoy-rekonfiguriruemoy-platformy-dlya-vysokoproiz/>.
3. Майн-машины. Описание технологии и каталог. URL: <https://mindmachine.ru/catalog/shop/>.
4. *Кашкаров А.П.* Как преодолеть творческий кризис? Ростов н/Д: Феникс, 2015. 321 с.
5. Первый в Европе коммерческий беспилотник для доставки товаров. URL: <https://motor.ru/news/loxo-07-12-2022.htm>.
6. Беспилотные ТС (мировой рынок). URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/>.
7. Управление безопасностью устройств IoT. URL: <https://aws.amazon.com/iot-device-defender>.
8. DreamStalker Ultra. Простое вхождение в осознанный сон. URL: <https://mindmachine.ru/catalog/shop/dreamstalker-ultra/>. 



## ВАШ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОПУТЧИК!

### Полосковые дисплеи для транспорта

- ЖК-дисплеи серии SPANPIXEL™ с яркостью до 3000 кд/м<sup>2</sup>
- Размеры по диагонали от 6,2 до 65"
- Разрешение до 4K2K
- Угол обзора 178° (во всех плоскостях)
- Диапазон рабочих температур (некоторых моделей) –30...+85°C
- Возможна разработка под заказ
- Ресурс до 100 000 часов

**PROCHIP**  
POWERED BY PROSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА  
(495) 232-2522 • INFO@PROCHIPRU • WWW.PROCHIPRU



PROCHIP

# Современная электроника в лазерной технике. Новейшие разработки, эксперименты, перспективы. Обзор

Андрей Кашкаров (ak35@yandex.ru)

Мощным твердотельным оптическим квантовым генератором недавно научились «направлять» молнию, на бытовом уровне в сравнении со светодиодным излучением лазерная технология показала себя перспективной не только как источник разноцветного видимого спектра, но особенно в производственной и медицинской области, где, соответственно, с его помощью изменяют свойства металлов и удаляют новообразования. Учёные на пути к условно недорогому (рентабельному), экологичному и почти «бесконечному» источнику энергии; речь идёт о создании электростанций на основе безопасных минигенераторов с термоядерной реакцией. В статье показаны новейшие достижения и перспективы инженерной мысли разработчиков РЭА, представленные в течение 2022 года.

## Лазерный генератор, управляющий энергией молний

В 1782 году Бенджамин Франклин на свои деньги оснастил металлическими штырями крыши 400 общественных зданий в Филадельфии. И сегодня многие согласятся, что изобретённый громоотвод является простой, а потому доступной многим (хотя и не единственной) формой защиты от «небесного электричества», природа которого достойна рассмотрения в отдельной статье. И всё же вертикально расположенные стержни не всегда обеспечивают оптимальную защиту высотных конструкций и зданий. Даже в наши дни от ударов молний продолжают гибнуть люди. Поэтому наблюдения и исследования в этой области ведутся постоянно, и есть практические и перспективные результаты. Один из недавних примеров таков. На вершине горы Сентис в

Аппенцелле (Швейцария) установили мощный лазерный генератор LLR (Laser Lightning Rod); это разработка Европейского консорциума – Женевского университета (UNIGE), École Polytechnique (Париж), EPFL, Школы инженерии и менеджмента HEIG-VD и научных лазеров TRUMPF (Мюнхен). В продолжающихся исследованиях специалисты Лаборатории электромагнитной совместимости (EMC) изучили типизацию восходящих грозовых разрядов и развернули экспериментальные установки для наблюдения за молниями в сотрудничестве с HEIG-VD/HES-SO. Согласно результатам практических исследований 2021–2022 года луч мощного квантового генератора отклонил молниевый разряд на несколько десятков метров, причём в условно плохую погоду (в зоне ограниченной видимости с обильными осадками). Результаты исследования опубликованы в январе 2023 года

в [1], [8]. На рис. 1 и рис. 2 представлена моделированная иллюстрация работы лазерной установки для отклонения молниевых разрядов.

Мощность LLR, установленного на вершине горного массива Сентис (высота 2502 м над уровнем моря) рядом с телекоммуникационной вышкой Swisscom (124 м), составила около 1 ТВт (тераватт). Результаты эксперимента признаны валидными и верифицируемыми, так как их зафиксировали несколько измерительных станций, расположенных в гористой местности, с обязательной синхронизацией времени, мониторинга и возможностей управления, а также приборы разного назначения – от измерения тока молнии на мачте, антенны электромагнитного поля, рентгеновских датчиков, видеокамеры и интерферометрической системы для отображения грозового разряда до устройств абстрактного измерения напряжённости поля. Результаты одновременных наблюдений подтвердили эффект направления молнии с помощью мощного лазера. Вышка Swisscom широко известна за пределами региона, является одним из высоких и «популярных» (для молний) громоотводом в Европе, и в неё «небесное электричество» ударяет сотню раз в год (по несколько раз за одну энергетическую «атаку»). Фактические результаты фотофиксации отклонения молниевых разрядов представлены на рис. 3 и 4.

Используя интенсивные лазерные импульсы для создания ионизиру-

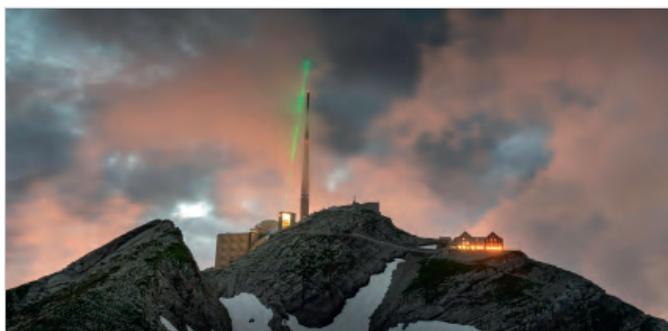


Рис. 1. Моделированная схема работы лазерной установки для отклонения молниевых разрядов



Рис. 2. Иллюстрация отклонения молниевых разрядов лучом мощного квантового генератора

ванного воздуха, являющегося электропроводным, LLR применили для направления молнии по её лучу. По результатам эксперимента констатировали, что «лазерный луч», направленный вертикально и много выше от верхней точки традиционного громотвода, является громоотводом, позволяет управлять молнией и повышает площадь защищаемой области. Проект LLR предусматривал разработку квантового генератора со средней мощностью 1 кВт, силой 1 Дж в импульсе и длительностью импульса в 1 пс (пикосекунду). Устройство квантового генератора TRUMPF имеет ширину 1,5 м, длину 8 м и весит более 3 т. Схематично вид устройства представлен на рис. 5.

Обязательный и важнейший элемент лазерной установки любой мощности – эрбиевый волоконно-оптический усилитель EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) на основе оптического волокна, легированного ионами. Этот «лазер накачки» (ЛН) является источником энергии, за счёт которой многократно усиливается оптический сигнал. Энергия ЛН так распределяется в усилителе EDFA между оптическими каналами, что чем их больше, тем бóльшая мощность накачки востребована; чтобы обеспечить это условие, разработчики применяют несколько ЛН. В упрощённом виде структура квантового лазера с ламповой накачкой представлена на рис. 6.

Твердотельный оптический квантовый генератор (рис. 5) активировался каждый раз, когда прогнозировалась штормовая активность. Всё это для того, чтобы убедиться – будет ли разница в характеристиках разрядов молний при «подсветке» неба лазерной установкой и без неё. Район экспериментов был закрыт для воздушного движения заранее. Затем сравнили полученные данные, когда применялся лазерный луч, направленный в небо рядом с громотводом – вышкой, и когда в громотвод естественным образом ударяла молния (при выключенном квантовом генераторе). Разряд может следовать за лучом почти на 60 метров (отклонение в сторону), прежде чем достигнет верхней точки, что означает увеличение радиуса защитной поверхности со 120 до 180 м. Это первый подтверждённый случай на местности с лазерным генератором высокой мощности. Более ранние результаты наблюдали только в лабораторных условиях. В перспективе работа над увеличением дальности воздействия на молнию, то есть условной

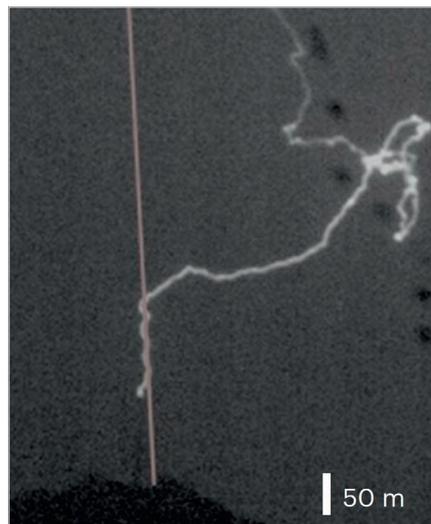


Рис. 3. Фотофакт молниевое разряда и его отклонение к лучу квантового генератора

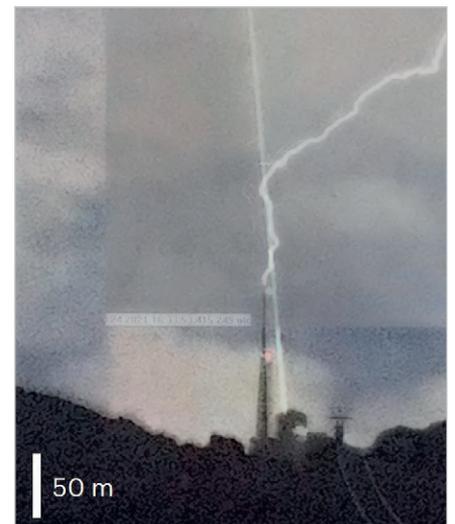


Рис. 4. Воздействие молниевое разряда на верхнюю точку вышки и последующего «заземления»

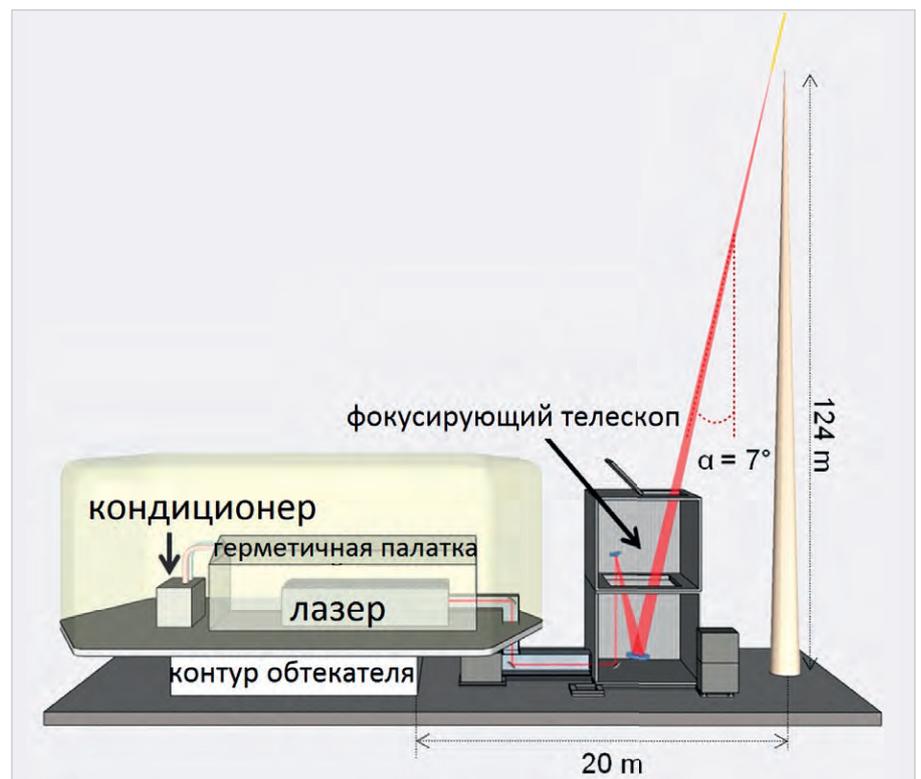


Рис. 5. Схематичный вид квантового генератора, применённого для отклонения молниевое разряда

высоты «лазерной пушки». Пока промежуточная цель соотносится с действием LLR на расстоянии 500 метров, при длине излучающей поверхности лазерной пушки всего в 10 метров (между высшей точкой и основанием). На рис. 7 представлена зависимость электрических сигналов, замеренных для положительных восходящих импульсов.

Шкала электрического поля дана по левой оси ординат в значениях  $\text{кВ}\cdot\text{м}^{-1}$ . При этом импульсный ток фиксировался от 0 до 4 кА.

На рис. 8 представлена осциллограмма сигнала, где каждый пик соответствует интегральной энергии рентгеновского излучения в периоде 50 нс.

Внизу осциллограммы – время в мс, слева – по оси ординат – ускоряющее напряжение, измеряемое в КэВ (keV). При означенных условиях ионизированный поток филаментации может достигать сотен метров при начальной мощности импульса около 1 кВт с продолжительностью импульса в единицы пс. Среди выводов [1] весьма много интерес-

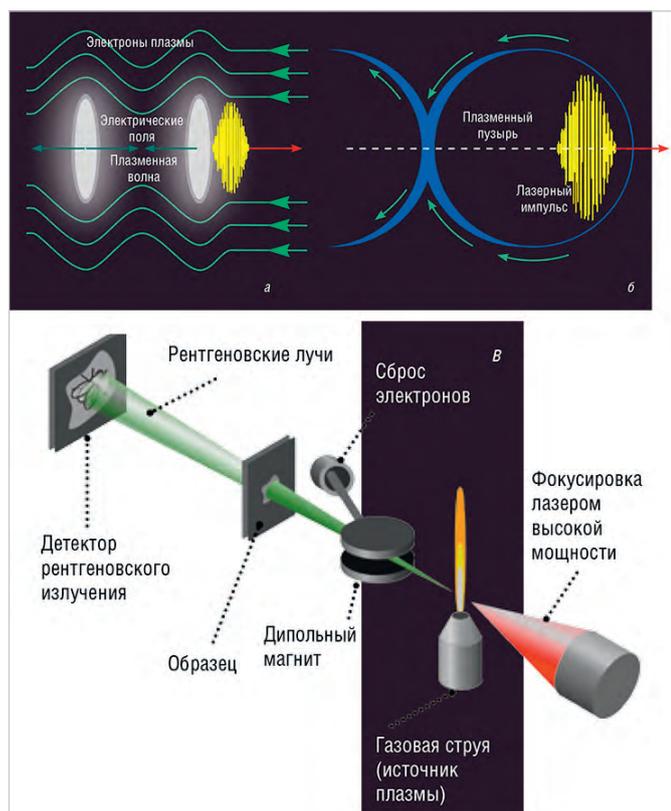


Рис. 6. Структура квантового лазера с ламповой накачкой

ного, в частности, то, что молнией можно «управлять» на расстоянии до километра от продемонстрированной лазерной установки, а если её совершенствовать с повышением мощности, то и более того. Разряды квантового генератора, направленные с земли, могут не только отклонять (на себя) молниевый потенциал, но и вызывать его по необходимости при соответствующих погодных условиях. Надо полагать, примерно такой же эффект (при соответствующих условиях обеспечения энергоносителя) можно получить с подвижной лазерной установки не только на земле, но и в атмосфере. Теперь идея управляемого воздействия в формате «звёздных войн», увлекавшая общество в 80–90-х гг. XX века, отчасти разъяснена. Апробированный в Швейцарии комплекс LLR, в отличие от ранее известных мощных лазеров, функционирует в сложных погодных условиях, мощный луч квантового генератора пронзает даже туман и облака. Это не снилось даже инженеру Гарину из фантастического романа Алексея Толстого, написанного в 1927 году.

### Квантовый генератор для реакции термоядерного синтеза

В Ливерморской лаборатории (США) в декабре 2022 года в результате очередного эксперимента с участием мощно-

го квантового генератора констатировали, что впервые потратили на запуск термоядерной реакции меньше энергии, чем получили в результате. Ранее, в 2021 году, удалось получить выходную энергию в размере 70% от затраченной, заменив дейтериево-третиевую мишень алмазной. С новым экспериментом 2022 года в результате термоядерного синтеза получено 3,15 МДж (мегаджоуля) энергии против затраченных 2,05 МДж [6]. Выводы пока делают очень осторожно. Тем не менее, чтобы решить основную проблему реакции термоядерного синтеза, необходимо удержать разогретую плазму в течение времени, достаточного для того, чтобы ядра начали «сливаться». Поскольку вещество разогревается до огромных температур (порядка  $10^8 \dots 10^9$  °C), ни один материал не может выдержать такой температуры. Очень важно для реакции не только мгновенно разогреть «мишень», но и удерживать её некоторое время, порядка  $10^{-9}$  с, в состоянии плавления.

Удержание плазмы в электромагнитном поле посредством реакторов типа токамак и стелларатора, различных по технологии создания магнитного поля, – известный альтернативный способ решения задачи. При этом токамак лучше поддерживает высокую температуру плазмы, а стеллараторы – обеспечивают относительно большее время

удержания. Давление могут создавать и другие виды излучения, к примеру, рентгеновское. Такие эксперименты считают менее безопасными по определению, но также проводят, используя в качестве мишени ядра гелия. Другим условно отрицательным фактором является сила тока огромных значений – порядка 20 млн ампер, что необходимо для генерации мощной рентгеновской установки в течение хотя бы 100 нс. Экспериментальные камеры заполнены трансформаторным маслом и деионизированной водой, и даже в таких условиях в момент генерации эм-импульса расположенные рядом металлические предметы начинают светиться [6].

Декабрьский эксперимент 2022 года в Ливерморской лаборатории реализовали по принципу инерционно-управляемого синтеза. Для исследования технологии инерционного термоядерного синтеза с 2009 года собрано 192 мощные лазерные установки с каскадами оптоэлектронных усилителей. На рис. 9 представлена иллюстрация механизма, удерживающего топливную мишень.

Для удержания плазмы задействованы силы инерции «топливного» вещества, мгновенно разогретого в импульсном режиме до состояния плазмы с помощью мощного квантового генератора ультракоротких импульсов излучения за  $10^{-15}$  фемтосекунд (фс). Воздействие лазе-

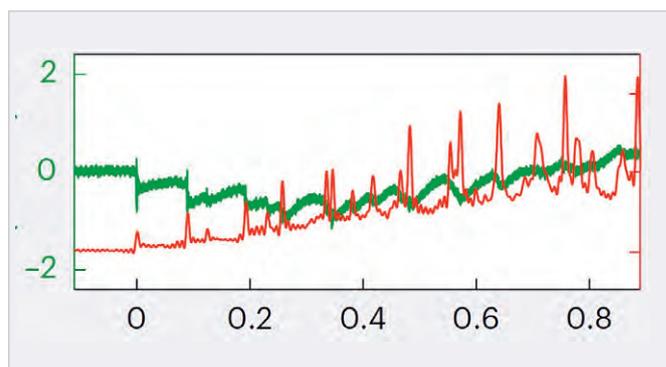


Рис. 7. Электрические сигналы, измеренные для направленных вверх вспышек

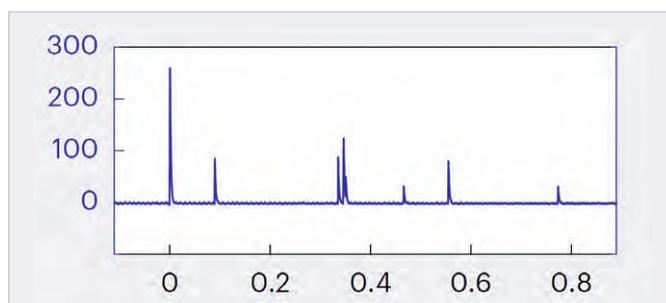


Рис. 8. Осциллограмма сигналов, где пик соответствует интегральной энергии рентгеновского излучения



Рис. 9. Внешний вид механизма, удерживающего топливную мишень. Фото: Lawrence Livermore National Laboratory



Рис. 10. Топливная мишень из дейтериево-тритиевой смеси в золотой оболочке (Lawrence Livermore National Laboratory)

ром на золотую мишень цилиндрической формы диаметром 2 мм серий ударных волн показало действенный результат для поддержки реакции синтеза частиц.

Ультрафиолетовая лазерная установка 2022 года с длиной волны 351 нм генерирует мощность, сопоставимую с 500 ТВт (тераватт). Под её воздействием «мишень» сжимается до плотности 1000 г/см<sup>3</sup>, давление эквивалентно 300 млрд атмосфер; таковы условия запуска реакции термоядерного синтеза. По 2 ядра дейтерия и трития – тяжёлого и сверхтяжёлого изотопов водорода сливаются в ядро гелия. Импульс такой лазерной установки моментально испаряет золотую оболочку цилиндра и разогревает дейтериево-тритиевую смесь. При этом фиксируется выделение энергии, эквивалентной энергии, выделяемой при сжигании 1 барреля нефти. На рис. 10 представлена «топливная мишень» из дейтериево-тритиевой смеси в золотой оболочке.

Результативность экспериментов в области ядерного синтеза условно оценивают в сравнении с полученной и затраченной на термоядерную реакцию энергией. К примеру, в 2018 году зафиксирован выход энергии, на 3,6% превышающий затраченную. И лазерная установка в эксперименте 8 декабря 2022 года показала свою перспективу. Идея термоядерной электростанции в принципе осуществима – это направление будущего, но пока опытного образца мы не имеем. Проблемные вопросы «лазерной технологии» определяются огромными затратами энергии на работу твердотельного квантового генератора в импульсном режиме. Элементы установки из-за огромных перегрузок работают в одноразовом режиме. Стоимость эксперимента соотносят с 3 млн USD [6].

Отсюда ясно, что пока о серийном или коммерческом производстве мощной лазерной установки речь не идёт. Но в современных разработках она становится практически осязаемой и доступной.

### Популярные области применения мало мощного квантового генератора и его необычные возможности

Оптический квантовый генератор – источник мощного узконаправленного монохроматического когерентного излучения, преобразующего возможные виды энергии накачки – световую, электрическую, тепловую, химическую (и др.) в энергию когерентного, поляризованного и узконаправленного потока. Принцип действия оптического квантового генератора известен из физики, иллюстрация представлена на рис. 11.

Число фотонов, движущихся вдоль оптической оси, лавинообразно возрастает. Достигнув полупрозрачного зеркала, излучение частично выйдет наружу, частично отразится и вновь используется для генерации импульсов. Усиленный и вышедший сквозь полупрозрачное кольцо поток фотонов создаёт направленный световой пучок большой интенсивности. Важность лазеров накачки (ЛН) рассмотрена в первых абзацах статьи. И нужно добавить, что при хорошей концентрации пучка и юстировке оптики в активный элемент возвращается до 75% энергии излучения источника. На рис. 12 представлена условная схема лазерного канала с усилителями – элементами ЛН.

На рис. 13 представлен лабораторный образец – иллюстрация работы лазерного канала с усилителями сигнала.

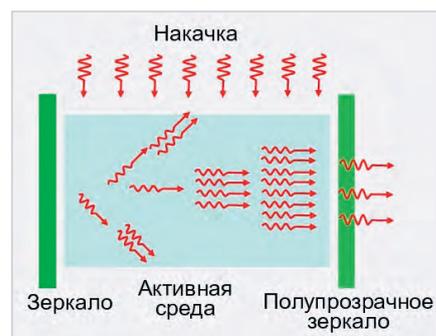


Рис. 11. Принцип действия квантового генератора (лазера)

Сфера применения простых квантовых генераторов широка – лазерное упрочнение стали, лазерная депиляция в медицинских учреждениях и способ борьбы с онкологией на примере удаления папиллом и других образований на коже человека, запатентованный способ нанесения цветного изображения лазерной гравировкой [10]. И даже осваивается лазерное облучение семян и развитие проростков [3]. В быту это можно применить как подсветка лазером невидимых в типичном спектре глазу человека и кратковременных явлений. Самое популярное среди сказанного – обнаружение пыли. Это иллюстрирует рис. 14.

Так, если нажать кнопку смыва унитаза при открытой крышке, крошечные капли воды разбрызгиваются в помещении на высоту до 2 метров. Исследование опубликовано в [4] и [7]. Частицы воды под давлением, согласно форм-фактору оборудования, взлетают вверх с начальной скоростью примерно 2 м/с, достигая высоты в 1,5 метра и последующего спада в течение 8 секунд. Крупные капли оседали на поверхностях в течение 2–3 секунд, но частицы размером менее 5 мкм оставались в услов-

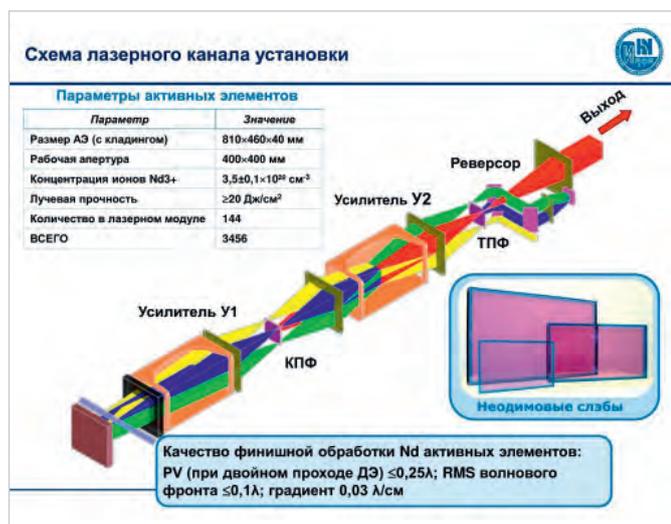


Рис. 12. Условная схема лазерного канала с усилителями – элементами ЛН

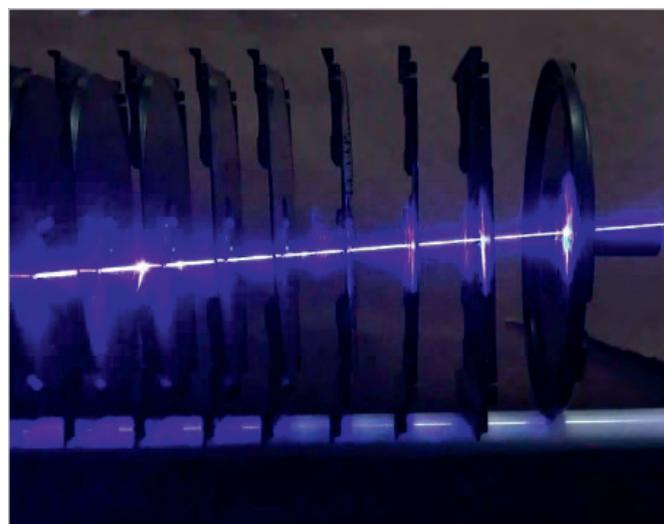


Рис. 13. Иллюстрация работы лабораторного образца лазерного устройства с усилителями сигнала



Рис. 14. Вариант использования бытового условно безопасного квартового генератора для контроля чистоты и прозрачности воздуха

но взвешенном состоянии в воздухе в течение нескольких (!) минут. При этом шлейф частиц отходов, включая и «твёрдые консистенции», насыщает воздух, увлажняя его, поднимается вверх к потолку и может проникать в соседнее помещение. Понимание траекторий и скоростей этих частиц, которые могут переносить патогены, такие как E. coli, C. difficile, норовирусы и аденовирусы, важно для снижения риска заражения в помещениях, где живут и работают люди [7]. От этого как никогда важна рекомендация – прикрывать двери в соответствующий кабинет, ибо болезнетворные микроорганизмы могут сохраняться на поверхности в том числе сантехнического оборудования даже после десятков смывов, а это увеличивает потенциальный риск заражения.

### «Указатели» и другие

Кроме того, новые технологии позволяют генерировать тысячи люменов светового потока из фокусного пятна размерами в несколько мкм. С помощью лазеров, оснащённых качественной оптикой даже с небольшим диаметром, можно вывести световой луч с конусом менее  $1^\circ$ . А такая концентрация светового потока может широко использоваться не только для «подсветки Луны» или низколетящих воздушных целей, чем иногда балуются подростки, и что, несомненно, опасно, до более прагматических устройств, к примеру, автомобильных фар дальнего света. В современных электронных устройствах небольшой мощности применяют лазерные фотоприёмники 2,4; 2,5; 3,8; 4,8 мкм и лазерные диоды с излучением в диапазоне 2...3,8 мкм. Однако в разнообразии лазерных устройств и установок необходимо разбираться. Устройства с лазерным диодом и батареей-аккумулятором, которые можно купить в магазине, именуют не иначе как «лазерные указки», большинство из которых годно в качестве световых указателей в небольшом помещении, к примеру, в классной комнате, или для игры «в догонялки» с домашними питомцами (кошки и собаки любят побегать за перемещающейся яркой точкой). Относительно хорошая бытовая указка имеет не только мощный лазерный диод и аккумулятор, но и систему зеркал и линз для фокусировки, концентрации луча (рис. 15).

Такое устройство OMEGA LASERS SUPREME BLUE 450SX5000, несмотря на его небольшую мощность и схожесть с «изобретением инженера Гарина», можно назвать бытовым, притом

что внешний вид и действие представлены на рис. 16 и 17.

На рис. 17 хорошо виден луч, в котором просматриваются пылинки в воздухе. Пожалуй, для таких показательных задач и может пригодиться подобное устройство – чтобы видеть пыль в помещении. Технические характеристики устройства впечатляют: выходная длина волны  $520 \pm 5 \text{ нм}$ , мощность  $> 5000 \text{ мВт}$ , в устройство встроен металлический радиатор, регулируемая фокусировка. Время разогрева лазерного диода  $< 30 \text{ с}$ . Дивергенция  $< 8 \text{ мрад}$ , диаметр точки в апертуре  $< 2,5 \text{ мм}$ , спектральная длина волны  $< 0,1 \text{ нм}$ . Срок работы лазера  $> 8000 \text{ ч}$ . Рекомендуемый режим: 30 секунд работы, затем 5-секундный перерыв. «Лазерные указатели», дальномеры и др. стоят до десятка тысяч рублей. Они неопасны, если не направлять их на лицо человека. Впрочем, устройство может быть задействовано как лазерный прицел (при условии доработки крепления). Луч, конечно, бьёт не на 1000 метров, как указано в сопроводительной документации, а едва ли на 500 – и то при условии хорошей погоды, отсутствии преград и пыли. Такими игрушками пользовались и авиаулиганы, подсвечивая низколетящие цели с земли и мешая управлению воздушным судном. С совершенствованием соответствующей правоприменительной практики эти явления, кажется, канули в Лету. В то же время мощный лазерный указатель, апробированный автором, – действенный вариант отпугивания агрессивных собак и диких животных. Некоторые автомобильные компании применяют лазерные диоды для

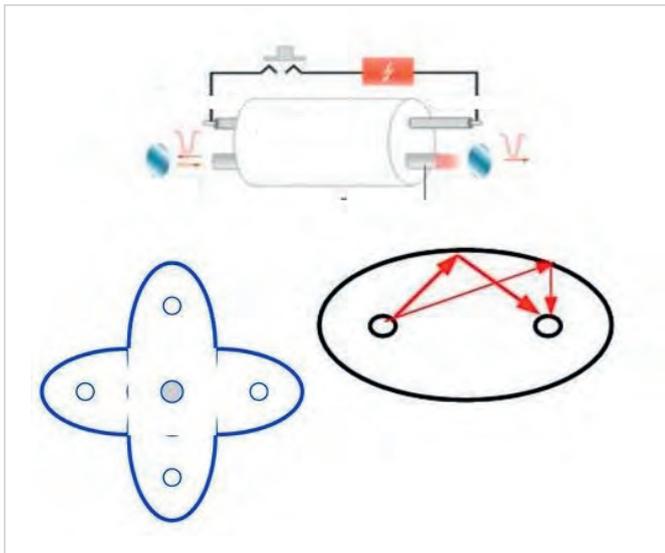


Рис. 15. Иллюстрация концентрации луча в лазерном устройстве



Рис. 16. Вид на полупрофессиональное лазерное устройство



Рис. 17. Иллюстрация действия устройства в помещении

совершенствования световых приборов «дальнего света», когда луч может освещать до 1 км пространства по ходу движения. На рис. 18 представлена полупроводниковая структура лазерного диода с понятными пояснениями.

Лазерный диод, как разновидность излучающего полупроводникового «светодиода» (LED – Light Emitting Diodes), был изобретён в XX веке и наиболее популярен для световых эффектов, когда луч, особенно в темноте, хорошо виден. А благодаря высокой концентрации виден на большом расстоянии, что даёт возможности точечной подсветки. Понятно, что обычный LED с его относительно рассеянным свечением производит иной эффект, нежели лазерный диод, изображение которого представлено на рис. 19.

Именно такие используют в «лазерных указателях» с мощностью 1–5 мВт, несмотря на то, что лазерные диоды оснащены двумя зеркалами на противоположных концах полупроводника. Одно из зеркал имеет частичную прозрачность, подобно двухстороннему зеркалу. Поэтому технически лазерный диод от светодиода LED отличается по конструкции исполнения. Исходящий лазерный луч формирует конус излучения всего лишь в 1–2° по сравнению с конусом светового излучения светодиода в 90°. Увеличение тока сверх определённого значения через LED резко снижает его эффективность. А эффективность лазерных диодов с увеличением тока почти не меняется. Эти особенности указывают на ценность лазеров для отдельных случаев применения, где светодиоды значительно уступают. Внутри диода лазер можно сфоку-

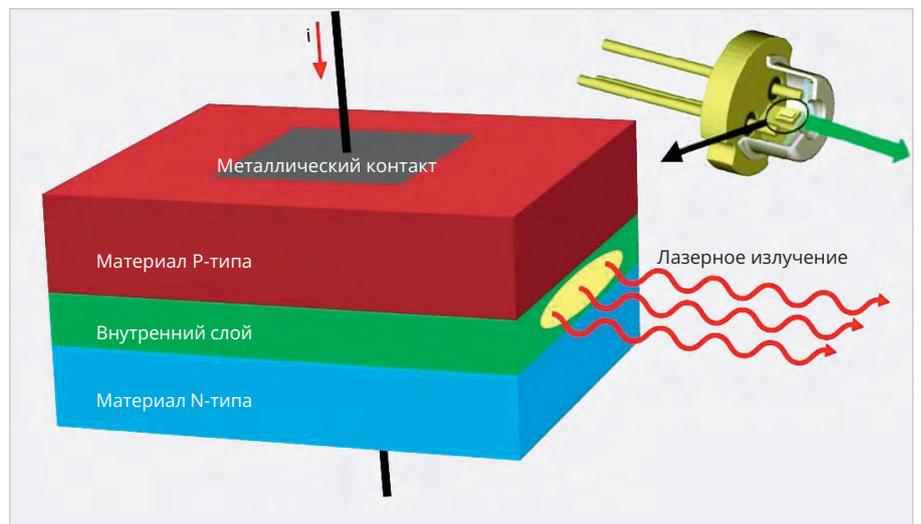


Рис. 18. Полупроводниковая структура лазерного диода



Рис. 19. Маломощный лазерный диод, длина волны 850 нм

сировать на крошечной точке люминофора для создания узкого интенсивного луча яркостью, в 20–50 раз превышающей яркость светодиода. При малом приложенном напряжении лазерный диод может заменить обычный светодиод; эффекта «лазера», как сконцентрированного пучка света, не будет заметно, но при увеличении электри-

ческого тока увеличивается мощность; когда превышает порог плотности потока, полупроводник излучает световой импульс с определённой его свойствами длиной волны; яркий пучок ещё более усиливается внутренними зеркалами. Вид на готовый универсальный модуль полуполярного галлий-нитридного лазера для поверхностного монтажа

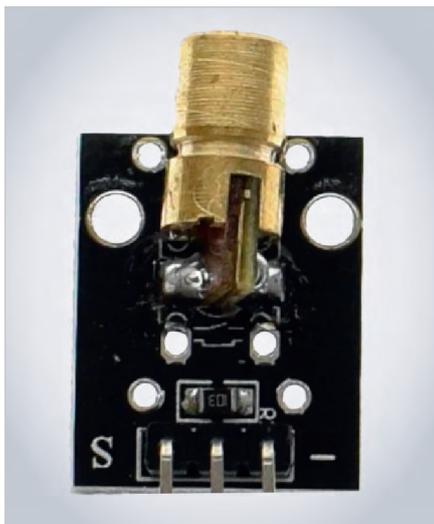


Рис. 20. Вид на готовый универсальный модуль с лазерным диодом-излучателем

жа, создающий световой поток условно «белой» цветовой гаммы – в основе с лазерным диодом-излучателем диаметром 7 мм, представлен на рис. 20.

В составе модуля лазерный диод, излучающий длину волны 450 нм, люминофор квадратной формы (1×1 мм), отражатель и элементы защиты – на плате. Модуль имеет КПД до 70% при плотности потока 3 Вт/см<sup>2</sup>. Световой поток лазерного кристалла, излучаемый с поверхности от 4 до 30 мкм, даёт примерно столько же оптической мощности, сколько дают светодиоды на площади 800 мкм. К слову, в конструкциях Blu-Ray оптических дисков соблюдались технологии 405-нанометровых фиолетовых лазеров. Лазерный луч условно синего цвета с помощью отражателя смешивается с жёлтым люминофором – всё это для получения на выходе «белого» света. Известна разная производительность полупроводниковых лазерных диодов; по убыванию прерогативы они расставлены так: синий (самый мощный), красный (менее мощный), зелёный (относительно слабый). Но какой бы ни был свет от лазерного указателя, луч, длительно направленный в глаза, грозит локальной потерей зрения. Можно ли рекомендовать использовать портативные лазерные приборы как средство личной безопасности, активируемое при нападении, – большой вопрос, который следует разрешить в сравнении степени предотвращённого и причинённого вреда. При использовании лазера рекомендую применять специальные защитные лазерные очки со светофильтрами наподобие маски сварщика.

Функционал устройства, представленного на рис. 15, обеспечивают два



Рис. 21. Иллюстрация работы лазерного уровня и дальномера для строительных работ

аккумулятора Li-Ion типа 16340 с номинальным напряжением 3,7 В каждый, подключаемых последовательно. Заявленная производителем из КНР энергоёмкость аккумулятора 3800 мА/ч, разумеется, действительности не соответствует. Однако условно «мощное» устройство-указатель (рис. 15) истощает аккумуляторы за 10 минут непрерывного применения. Поскольку мощность устройства не регулируется, желательно применять его в кратковременном режиме работы – не более 20 с, затем пауза 10 с. Данное устройство не может зажечь даже на близком расстоянии бумагу, спичечную головку (как анонсирует производитель) или привести к ожогу на коже человека. Впрочем, практическое применение подобного устройства, по мощности превышающего «смешные самоделки» в виде лазерных указателей и дальномеров (см. рис. 21), может иметь место при принудительном «ослепении» камер видеонаблюдения без ик-фильтров или с небольшим их количеством, установленных снаружи и внутри зданий; это проверено авторским экспериментом. Защита оптики светофильтрами, блокирующими излучение определённой частоты, – эффективное средство, однако против одновременного поражения лучами с разной длиной волны светофильтр бессилён; это к вопросу о перспективных разработках.

Есть аналогичные форм-фактору, представленному на рис. 18, дискретные лазерные диоды с разной длиной волны и мощности от 1 мВт до единиц Вт. Кроме популярного форм-фактора в корпусном исполнении ТО-18 распространены корпуса LA, LP, ТО-8 и др., о чём можно прочитать в [2].

### Элементная база как пример

Лазерные диоды с дисковым резонатором WGM и простейшей оптикой отличаются от условных аналогов с резонатором

Фабри-Перо по конфигурации: первые снабжены резонатором в форме диска и могут концентрировать луч 2...2,3 мкм. «Луч» циркулирует по краю резонатора и выходит за счёт рассеивания на микронеровностях поверхности. Для сбора лазерного излучения чип монтируется в центре корпуса ТО18 с параболическим отражателем. Лазерные диоды типового ряда WGM-20...WGM-23 разработаны для спектрального диапазона 2...2,3 мкм. Их применяют в драйверах преусилителей для фотодиодов, в электронных устройствах с датчиками – сенсорами газов и жидкостей (H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ...) и др.

В табл. 1 представлены портативные квантовые генераторы 3,01...3,08 мкм. Полупроводниковые лазерные диоды LD290...LD360, с резонатором Фабри-Перо разработаны для спектрального диапазона 2,9...3,6 мкм.

Для сравнения – основные параметры ИК-лазерного диода с оптической мощностью 1000 мВт представлены в табл. 2.

Элементы LD290...LD360 могут использоваться в паре с фотодиодами PD36, PD48 в устройствах приёма-передачи сигналов. Драйвер DLT-37M обеспечивает питание диодов LD200...LD230 в квазистационарном и импульсном режиме QCW – частота повторения импульсов 8 кГц, длительность 62 мкс – и режиме Pulse – частота повторения импульсов 8 кГц, длительность 2 мкс. Квантовый генератор мощностью более 5000 мВт, луч которого может быть виден при «идеальных» условиях на расстоянии нескольких километров, способен прожигать тонкий пластик и воспламенять сухие щепки, но бытовые так называемые «тоже лазеры» являются не более чем игрушками, которые, впрочем, могут нанести локальный вред зрению человека при неправильном использовании. На основе условно мощных лазерных диодов более 10 лет специальными службами (в том числе полицией) в правовом поле используются электронные устройства направленного действия для

Таблица 1. Лазеры с фокусом 2,9...3,6 мкм в корпусе ТО-18

Наименование лазера	Длина волны, мкм	Пороговый ток, мА	Диапазон рабочих температур, °С	Тип резонатора
QCW Pulse	1,98...2,04	1000–2000	20...150	W-300
LD-20	2,22...2,27		20...170	W-100
LD-23	2,23...2,26		20...100	W-200
WGM LP	2,24...2,28		40...150	W-300
LD300	2,94...3,19		30...120	FP LA
LD320	3,20...3,29		77...100	
LD340	3,30...3,39		77...150	
LD330	3,40...3,60			

Таблица 2. Технические характеристики лазерного ИК-диода с оптической мощностью 1000 мВт

Оптическая мощность	1000 мВ
Длина волны	850 нм
Напряжение	1,9...2,2 В
Ток	1200 мА
Ресурс работы	10 000 ч

нейтрализации активности задерживаемых лиц, к примеру, на основе лазерных диодов модельного ряда «Поток» и аналогичных.

### Перспективы квантовых генераторов различного назначения

Несколько лет назад реализована технология получения нелинейных кристаллов для параметрических генераторов света и изготовления диэлектрических покрытий; это позволило создавать надёжные и простые в эксплуатации источники лазерных импульсов, перекрывающие спектральный диапазон 200...20 000 нм. Но развитие инженерной мысли не стоит на месте и способствует новым разработкам концентрированного луча в УФ-, видимом, ближнем и среднем ИК-диапазонах, а среди источников перестраиваемого лазерного излучения основными считались лазеры на красителях и на активированных кристаллах (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Ti<sub>3+</sub>, alexandrit, форстерит, YAG: Cr<sup>4+</sup>) в диапазоне излучения 550...1500 нм, тогда как возможности генерации световых импульсов в спектральной области были шире: 20...300 нм. На рис. 22 представлены схема и структура (с пояснениями) твердотельных лазеров с ламповой и полупроводниковой начинкой (источником) на основе кристаллов иттрий-алюминиевого граната с добавлением ионов неодима Nd: YAG.

Разработчики устройств современной электроники совершенствуют источники излучения на основе ПГС, где удачно сочетаются широкий диапазон непрерывной перестройки и высокий КПД преобразования излучения «накачки лазера», к примеру, ПГС на кристаллах ВВО с накачкой 2-й и 3-й гармониками Nd: YAG-лазеров. ПГС на кристаллах КТР и КТА с накачкой излучением Nd-лазеров позволяют получать перестраиваемое излучение в ИК-диапазоне 1,5...4 мкм. Основными трудностями в

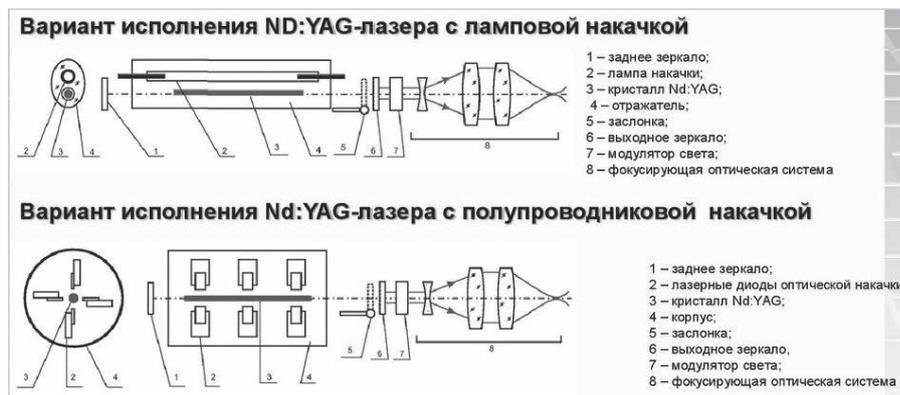


Рис. 22. Схема и структура (с пояснениями) твердотельных лазеров с ламповой и полупроводниковой начинкой (источником) на основе кристаллов иттрий-алюминиевого граната с добавлением ионов неодима

этой области спектра являются невысокий коэффициент параметрического усиления в нелинейных кристаллах, поглощение сигналов в ИК-области, внешние факторы паров и влажности в атмосфере. Для надёжной работы лазерной системы необходимо, чтобы длина волны генерации коррелировалась с прозрачностью атмосферы. К примеру, в ПГС, накачиваемых излучением 1064 нм, длины волн излучения сигнальной (λ<sub>s</sub>) и холостой (λ<sub>i</sub>) волн связаны между собой соотношением 1/λ<sub>i</sub> + 1/λ<sub>s</sub> = 1/1,0642 [мкм]. Учитывая свойства нелинейных кристаллов и наличие их собственного краевого поглощения в ИК-области, выделяют спектральные диапазоны, для которых можно создать надёжно работающие ПГС в «окнах» прозрачности атмосферы: 1,45...1,67; 1,98...2,3 и 2,93...4,10 мкм. Это перспективно, поскольку именно перестраиваемые лазеры, являясь основной частью современных оптоэлектронных приборов, позволяют решать задачи спектроскопии, нелинейной оптики, фотохимии, биологии, медицины и др. Развитие инженерной мысли направлено на разработку генераторов, перестраиваемых в определённых спектральных диапазонах излучения для лазерной спектро-

копии и фотохимии, где перспективные методы основаны на селективном взаимодействии лазерного излучения с веществом; дистанционного обнаружения веществ, включая лазерное зондирование атмосферы для определения её состава, загрязняющих примесей и измерения их концентрации; лазерной фотобиологии, медицинских технологий (к примеру, для удаления новообразований) и фотодинамической терапии и в др. случаях. Перспектива развития мощных, профессиональных (к примеру, в медицине и в производстве – для резки материалов), а также слабой реплики первых – бытовых квантовых генераторов расширяется. С учётом инноваций в области когерентного освещения для распределения интенсивного электромагнитного излучения уже осуществляется «программирование» света сложной структуры, доступное даже при невысокой мощности генерация луча – преобразования фемтосекундных импульсов в ультракоротком режиме. Это позволяет создавать гиперспектральный синхронный поток и способствует инновационным решениям завтрашнего дня в ядерной физике, военпроме и обеспечении безопасности жизни. С лазерной техникой человек уверенно созидает будущее.

## Литература

1. *Howard, A., Walch, P., Produit, T. et al.* Молния с лазерным наведением (2023). *Nature Photonics*. URL: <https://www.nature.com/articles/s41566-022-01139-z> и <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01139-z>
2. *Гулевич Е. и др.* Оптоэлектронные приборы для ближней и средней ИК-области спектра 0,7-5 мкм. URL: [http://www.photonics.su/files/article\\_pdf/2/article\\_2698\\_296.pdf](http://www.photonics.su/files/article_pdf/2/article_2698_296.pdf)
3. *Деревянко И.А.* Лазерное облучение семян и развитие проростков. URL: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018003485>
4. *Дун А.* Инженеры показали, как выглядят брызги воды из унитаза при смыве с поднятой крышкой. URL: <https://www.gazeta.ru/science/news/2022/12/08/19220905.shtml>
5. Лазерная указка OMEGA LASERS SUPREME BLUE 450SX5000 - адаптированная реплика. URL: [https://aliexpress.ru/item/1005002970816891.html?spm=a2g0o.search.search\\_results.66.3fb173119QLJDi&sku\\_id=12000023015824584](https://aliexpress.ru/item/1005002970816891.html?spm=a2g0o.search.search_results.66.3fb173119QLJDi&sku_id=12000023015824584)
6. *Медведев Д.* Сила инерции: как запустить термоядерную реакцию лазером. URL: <https://2051.vision/2022/12/16/nif/>
7. Новости науки и техники. Ученые подсветили лазером брызги из унитаза. URL: <https://xn--80akfo2a.xn--p1ai/2022/12/13/24586/>
8. Отражение молнии лазерным громотводом. URL: <https://actu.epfl.ch/news/deflecting-lightning-with-a-laser-lightning-rod-2/>
9. Патент RU 2 774 048 С1. Алимов А.В. Способ нанесения цветного изображения лазерной гравировкой. URL: <https://xn--80akfo2a.xn--p1ai/2022/12/14/24593/>
10. *Разина Е.А., Коренивский Н.В.* Технология маркировки материалов при помощи лазерного оборудования. С. 136-139. URL: <https://xn--80akfo2a.xn--p1ai/2022/12/09/24551/>



## НОВОСТИ МИРА

### Российские учёные осваивают терагерцевый диапазон

В НИЯУ МИФИ продолжает работу V Всероссийская конференция с международным участием «Терагерцевое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и приложения ТЕРА-2023».

Новейшие терагерцевые технологии уже сегодня играют важную роль в самых разных областях: от радиоастрономии до медицины, от сферы противодействия терроризму до систем связи 6G. По мере увеличения плотности информационных потоков именно терагерцевые технологии способны стать главным направлением развития техники передачи и обработки информации.

Такие технологии являются логическим продолжением развития радиотехники по мере освоения области всё более высоких частот. Терагерцевый диапазон (от 100 ГГц и выше) находится на стыке радиотехники и оптики, в силу чего генерация терагерцевого излучения, его распространение, взаимодействие с окружающей средой и, наконец, его детектирование имеет ряд особенностей, которые и являются предметом изучения ученых в России и за рубежом. У истоков этого научного направления стояли такие выдающиеся отечественные физики, как Сергей Вавилов, Павел Черенков, Пётр Лебедев и Александра Глаголева-Аркадьева.

В 2015 году в МГУ им. М.В. Ломоносова, где прошла первая российская конференция по этой тематике, был подписан меморандум о создании Международного терагерцевого консорциума, в который вошли более 130 институтов из 30 стран. С тех пор конференция «ТЕРА» стала важным научным событием, объединяющим российских и иностранных учёных. Соорганизаторами V конференции выступают НИЯУ МИФИ, РАН, НИЦ «Курчатовский институт» и МГУ им. М.В. Ломоносова.

Цель конференции – обсуждение актуальных теоретических и экспериментальных научных результатов в области технологий СВЧ- и ТГц- электромагнитных волн, организация экспертной площадки по обсуждению и формированию векторов развития в этой предметной области.



Открывая конференцию, ректор НИЯУ МИФИ Владимир Шевченко отметил, что это знаковое событие не случайно происходит в стенах ядерного университета. Исследования в области СВЧ- и ТГц- электромагнитных волн также являются для НИЯУ МИФИ приоритетными.

В настоящее время работы в сфере терагерцевых технологий (в том числе, в рамках программы «Приоритет 2030») в НИЯУ МИФИ ведут несколько научных групп. Кафедра «Физика микро- и наносистем» проводит исследования в области молекулярной спектроскопии и радиовидения (получения изображений в реальном времени в ТГц-диапазоне). Центр радиофотоники и СВЧ-технологий и кафедра «Физика конденсированных сред» – в области материалов и устройств для генерации терагерцевого излучения (в частности, здесь ведутся работы по оптимизации широкополосных терагерцевых излучателей на основе низкотемпературных полупроводников). Теоретики кафедры физики конденсированных

сред разрабатывают новые принципы генерации терагерцевого излучения на основе ускорителей заряженных частиц высокой энергии.

«Уверен, что конференция даст новый импульс учёным и студентам НИЯУ МИФИ и станет стимулом развития этих перспективных направлений – как в научном, так и в прикладном смысле», – сказал Владимир Шевченко.

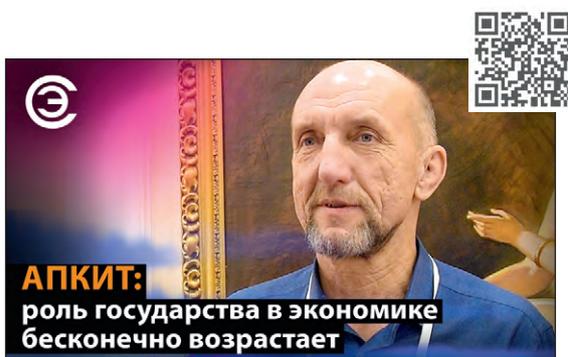
Ректор НИЯУ МИФИ также особо отметил, что конференция стала первым большим научным мероприятием, которое проводится в новом Научно-лабораторном корпусе – здании, которое призвано стать центром научной жизни университета.

Сопредседатель конференции, член-корреспондент РАН, профессор физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и руководитель группы терагерцевой оптоэлектроники и спектроскопии Александр Шкуринов зачитал приветствие участникам конференции от ректора МГУ Виктора Садовниченко. Свои приветственные обращения в адрес участников конференции направили также президент НИЦ «Курчатовский институт» Михаил Ковальчук и первый вице-президент РАН Владислав Панченко.

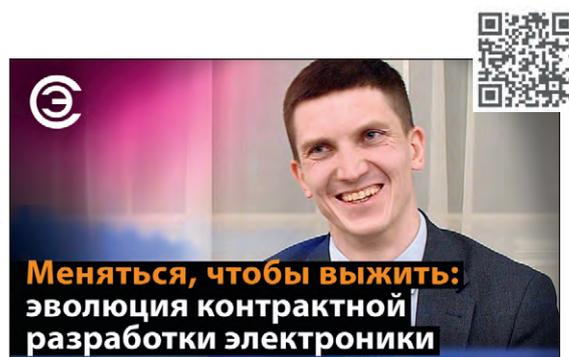
Научную часть конференции открыли доклады директора Международного научно-образовательного центра «Фотоника» при Саратовском государственном университете Валерия Тучина «Терагерцевая биофотоника» и заведующего Лабораторией оптоэлектроники двумерных материалов МФТИ Дмитрия Свинцова «Сверхчувствительное терагерцевое детектирование на графеновых полевых транзисторах». Всего за четыре дня работы на конференции будет представлено около 100 докладов по различным направлениям терагерцевой науки.

*mephi.ru*

Смотрите на канале **СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**



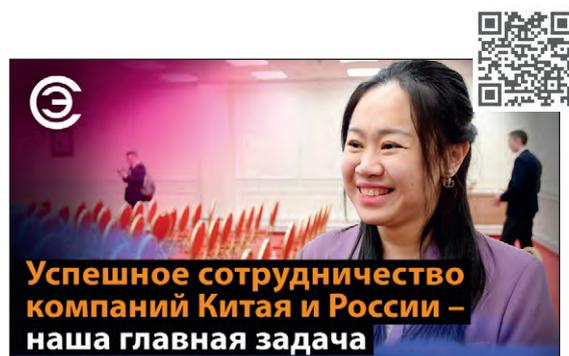
Интервью с Николаем Комлевым – исполнительным директором АПКИТ (Ассоциации предприятий компьютерных и информационных технологий)



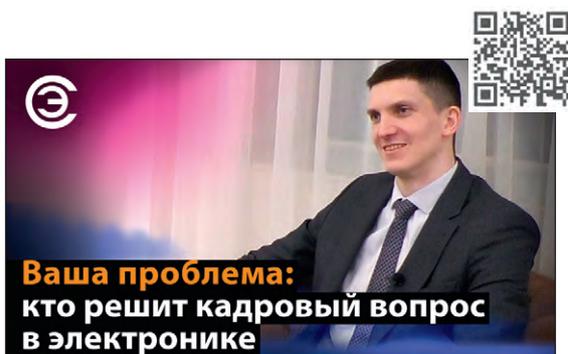
Интервью с Иваном Ларионовым – руководителем Комитета контрактной разработки АРПЭ, генеральным директором компании «Третий пин»



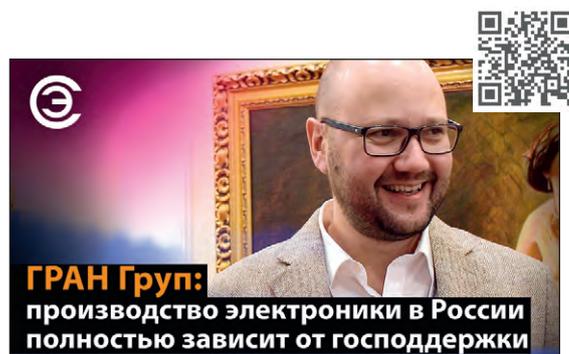
Интервью с Егором Макеевым, директором по продажам Макро EMS



Интервью с Ян Дань – Президентом Союза Русско-Гуандунских предпринимателей



Интервью с Иваном Ларионовым – руководителем Комитета контрактной разработки АРПЭ, генеральным директором компании «Третий пин»



Интервью с Александром Афанасьевым – генеральным директором ООО «ГРАН Групп»

**ADVANTIX**  
ПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ

## Безвентиляторный компьютер 1U с резервированным питанием IPC-SYS8FN2

**Плата управления питанием**

PSC-200® AdvantiX



**Компактный дизайн**

Высота 1U,  
для 19" стойки



**2x SSD 2,5"**  
с поддержкой  
RAID 0/1

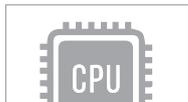


**Безвентиляторная система охлаждения**



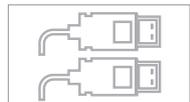
**Высокая производительность**

Intel® Core™ i 8-9 Gen



**Видеовыходы:**

2x Display Port  
1x HDMI



**Слоты расширения:**

1x PCIe  
1x mPCIe  
2x M.2



**Гибкие возможности питания:**

AC/DC с опцией резервирования



- Чипсет Intel Q370
- Слоты расширения: 1x PCIe x16 полной высоты, половинной длины, 1x M.2 с поддержкой PCIe x4 и SATA3, 1x M.2 с поддержкой PCIe x1 и USB2.0, 1x mPCIe (Full/Half)
- Поддержка российских ОС Astra Linux, Alt Linux, RedOS
- Рабочая температура от +5°C до +40°C. Опционально доступны от -20°C до +60°C (AC-версия) или от -40°C до +60°C (DC-версия)
- Порты: 4x USB 3.1, 2x USB 2.0, 2x DP, 1x HDMI, 2x LAN (RJ-45), 2x RS-232/422/485, 2x RS-232 (опция)

**PROSOFT®**

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

[WWW.PROSOFT.RU](http://WWW.PROSOFT.RU)

