

Принципы отбора микропроцессорных и фотонных технологий для первоочередного производства на российских литографах¹

М. Джериби, А.М. Сухов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
Самара, Россия e-mail: sukhov@ssau.ru

Поступила в редколлегию 10.13.2025 г. Принята 25.11.2025 г.

Аннотация—В настоящей работе сформулированы принципы отбора микропроцессорных технологий и элементов дифракционной нанофотоники для первоочередного производства на российских литографах. Сделана попытка определить приоритеты при выборе архитектуры процессора, операционной системы и прикладных технологий. Обоснован выбор RISC V (Reduced Instruction Set Computer) в качестве предпочтительной архитектуры российского микропроцессора. Система управления должна базироваться на основе операционной системы GNU/Linux. RISC-V и GNU/Linux представляют собой примеры открытых технологий, которые активно развиваются и используются в различных областях вычислительной техники. Литографы с разрешением 350 нм открывают широкие возможности для разработки и серийного производства высококачественной дифракционной оптики для инфракрасной техники. В качестве технологии для прикладных нужд выделен стандарт DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications). Это телекоммуникационный стандарт для локальных нужд, который был разработан для беспроводной телефонии, но со временем стал широко использоваться в других приложениях, таких как системы передачи данных и локальные сети. Технология DECT переживает второе рождение благодаря растущему интересу к Интернету вещей (Internet of Things, IoT).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микропроцессоры для российских литографов, выбор архитектуры для российского процессора, технология для прикладных задач, стандарт DECT.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_3.1_537

1. ВВЕДЕНИЕ

Любая информационно-коммуникационная технология состоит из двух основных составляющих, программной и аппаратной. Рост производительности подобных технологий зависит от прогресса как в аппаратной, так и в программной частях. В области программного обеспечения Россия практически не отстает от мирового уровня, большинство появляющихся технологий получают развитие в стране, в том числе и на уровне собственных разработок. Сроки освоения новых технологий не превышают критического уровня. В России существует множество компаний и стартапов, которые активно развивают программное обеспечение и внедряют новые технологические решения. В последние годы наблюдается рост интереса к таким направлениям, как искусственный интеллект, машинное обучение, блокчейн и кибербезопасность. Совершенно другая ситуация складывается в области электроники, где фиксируется критическое отставание. Оно особенно заметно в контексте дефицита полупроводников, которое усугубляется влиянием санкций. Производство электроники опирается на различные технологические

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00041)

процессы, которые описываются разрешающей способностью. В России закуплено оборудование для производства по технологическим процессам до 65 нанометров (нм), но наиболее сложные из закупленных технологий еще не запущены. Кроме того, поставки новых литографов, запчастей и расходных материалов к ним также находятся под санкциями, что значительно ограничивает объем производимых микрочипов. Поэтому производство российских литографов и комплектующих к ним позволит преодолеть дефицит производства. Полностью импортозамещенной технологией можно считать только ту, при производстве которой использовалось только отечественное оборудование, включая литографы. Отечественные литографы уже находятся в опытной эксплуатации [1]. Тем не менее, важно уже сейчас составить список технологий, которые будут в первую очередь реализовываться на отечественных литографах. Для этих технологий нужно начинать разработку топологии чипов и сопутствующей электроники устройств нанофотоники, а также программного обеспечения для управления ими. В настоящем исследовании будет сделана попытка сформулировать принципы, позволяющие отбирать инфокоммуникационные технологии, процессоры для которых должны быть воспроизведены в первоочередном порядке. При составлении списка подобных технологий и требований к ним будут использоваться чатботы на основе больших языковых моделей. Начнем с составления таблицы соответствия различных процессоров для инфокоммуникационных технологий и разрешающей способности технических процессов, применяемых для их производства. Отменим, что значительная доля технологий не требует высоких разрешающих способностей для производства соответствующей электроники. Искусственный интеллект может значительно упростить процесс составления технических заданий, автоматизируя генерацию текста и снижая влияние человеческого фактора. Использование ИИ в составлении технических заданий может быть эффективным, но требует внимательного подхода к контролю содержания, чтобы минимизировать вероятность ошибок и неточностей. Техническое задание не требует значительной детализации, поэтому ошибки маловероятны. Тем не менее, необходимо произвести дополнительную верификацию данных, например с помощью интернет поисковых систем. Запуск производства новой линейки микропроцессоров требует комплексного подхода, охватывающего не только их проектирование, но и разработку программного обеспечения для управления, интеграцию с периферийными устройствами и поддержку прикладных задач. Такой подход включает в себя создание экосистемы, которая будет поддерживать новые технологии в комплексе, а также обеспечивать совместимость с существующими решениями.

Отечественная литография долгое время была ориентирована на создание микроэлектроники, где ключевым параметром является минимальный размер транзистора. В дифракционной оптике и нанофотонике важен не только размер, но и точность формирования объемной структуры.

2. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Разрешающая способность технологических процессов для электроники стартовала в семидесятых годах прошлого века со значения в десятки микрон (мкм). С тех пор она прошла ряд стадий и достигла показателей в единицы нанометров (нм) к настоящему времени. В ходе эволюции можно выделить следующие этапы развития разрешающих способностей технологических процессов [2].

- Ранние технологии (1970-е - 1980-е годы) характеризуются использованием больших транзисторов (10 мкм и более).
- Улучшение литографии (1990-е годы), внедрение технологий фотолитографии и переход к размерам транзисторов менее одного микрона
- Масштабирование и многослойные структуры (2000-е годы), переход к разрешениям 90 нм и 65 нм.

- Нанотехнологии и новые материалы (2010-е годы), переход к размерам 28 нм и меньше.
- Инновации в архитектуре (2020-е годы и далее), разработка архитектур с использованием 3D-структур, внедрение технологий для улучшения производительности и снижения энергопотребления, использование EUV (Extreme Ultraviolet Lithography) для повышения разрешающей способности литографии.
- Использование ИИ для оптимизации проектирования и производства процессоров.

Поставка современного литографического оборудования была ограничена для российских предприятий задолго до введения всеобъемлющих санкций в 2022 году. Тем не менее, оборудование для ряда технологических процессоров было закуплено заранее, смонтировано и эксплуатируется в настоящее время. На данный момент в России доступны технологии для производства чипов с разрешающей способностью до 65 нм. Существующие производственные линии в России не способны полностью удовлетворить потребности в производстве процессоров и другой микроэлектроники. После введения санкции возник огромный спрос, имеющееся оборудование перегружено. К этому добавляются трудности с обслуживанием производственных линий и с расходными материалами. Поэтому спрос не удовлетворён даже на электронику, выпускающуюся по самым простым техпроцессам. По сообщению ТАСС первый российский литограф, обеспечивающий выпуск чипов размером до 350 нм, создан и проходит испытания в составе технологической линии в Зеленограде. Чипы размером 350 нанометров хоть и считаются большеразмерными чипами, но до сих пор используются во многих отраслях экономики, в том числе в автопроме, энергетике и телекоммуникациях. Разработка велась совместно с белорусской компанией «Планар» и обладает рядом и обладает рядом преимуществ по сравнению с предыдущими разработками. Увеличена площадь рабочего поля, максимальный диаметр обрабатываемых пластин а в качестве источника излучения твердотельный лазер. Ведутся работы по адаптации разработанной технологии для техпроцесса 240 нм, а также литографами нового поколения с разрешением 130 нм. Однако гарантировать сроки окончания подобных работ достаточно тяжело, поэтому лучше опираться на успешно опробованные решения.

Далее будет сделана попытка выяснить, процессоры для каких инфокоммуникационных технологий необходимо разрабатывать в России в первую очередь. Также попытаемся определиться с архитектурой для процессоров, низкоуровневым и высокоуровневым программированием, а также возможностью использования распространённых операционных систем с открытым кодом.

Технологические процессы 350 нм и 500 нм использовались в производстве микропроцессоров с конца 1990-х до начала 2000-х годов. Приведем ниже краткий список технологий и процессоров, которые могут быть реализованы с использованием технологических процессов 350 (500) нм.

- MTI VR4300i (1995 г, 133 МГц) — использовался для встраиваемых устройств и игровых консолей.
- Intel Pentium (1995), Pentium Pro (1995), Pentium II (1997).
- AMD K5 (1996), K6 (1997).- первый процессор AMD с собственным дизайном, совместимый с архитектурой x86
- Nvidia RIVA 128 (1997, графический процессор).
- Atmel ATmega328, используемый в Arduino UNO.
- Parallax Propeller (2006- многоядерный микроконтроллер.

Технологические процессы 350 нм и 500 нм позволили создавать высокопроизводительные устройства, такие как графические процессоры, микроконтроллеры и центральные процессоры, которые стали основой для многих современных вычислительных систем.

3. ВЫБОР АРХИТЕКТУРЫ ДЛЯ РОССИЙСКОГО ПРОЦЕССОРА

Архитектура процессора определяет, как процессор обрабатывает инструкции, управляет памятью и взаимодействует с другими компонентами системы. Существует несколько типов архитектур процессоров, каждая из которых имеет свои особенности и применения. Основные типы архитектур:

1. CISC (Complex Instruction Set Computing) использует обширный набор инструкций, позволяющий выполнять сложные операции с помощью одной команды.
2. RISC (Reduced Instruction Set Computing) Архитектура RISC использует упрощенный набор инструкций, каждая из которых выполняет одну простую операцию. Это позволяет ускорить выполнение инструкций и упростить процессор [3].
3. VLIW (Very Long Instruction Word) архитектуры позволяют компилятору упаковывать несколько инструкций в одну длинную инструкцию для параллельного выполнения [4].
4. EPIC (Explicitly Parallel Instruction Computing). Архитектура вычислений, разработанная для повышения производительности за счет параллелизма.
5. Суперскалярные архитектуры, процессоры имеют несколько исполнительных единиц (арифметико-логическое устройство (АЛУ) и устройство с плавающей точкой (ФПУ) и т.д.),
6. Многоядерные архитектур, на одном чипе (или в одном процессоре) размещено несколько вычислительных ядер.
7. Гетерогенные архитектуры, которые используют разные типы ядер (например, высокопроизводительные и энергоэффективные) в одном процессоре.

На начальной стадии собственного производства следует выбирать простейшую архитектуру с упрощенным набором инструкций, каждая из которых выполняет одну простую операцию. Это простое требование позволяет ограничить выбор архитектуры технологией RISC.

Среди основных типов процессоров RISC можно выделить

- MIPS (Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages): Широко использовался в встраиваемых системах и сетевых устройствах.
- SPARC (Scalable Processor ARChitecture). Используется в серверах и рабочих станциях, разработан компанией Sun Microsystems.
- ARM (Advanced RISC Machine). Один из самых популярных процессоров для мобильных устройств и встраиваемых систем.
- RISC-V: Открытая архитектура, которая может быть адаптирована для любых систем.
- POWER: Архитектура, разработанная IBM, используется в серверах и высокопроизводительных вычислениях.

Среди всех вышеупомянутых типов процессоров только процессор RISC-V: базируется на открытой архитектуре [5]. Она была разработана в Университете Калифорнии в Беркли. RISC-V предоставляет открытые спецификации, что позволяет любому желающему разрабатывать процессоры, системы на кристалле (SoC) и программное обеспечение на основе этой архитектуры без необходимости платить лицензионные сборы.

Существует активное сообщество разработчиков и исследователей, которые работают над улучшением и расширением архитектуры, что способствует быстрому развитию и внедрению новых технологий. RISC-V имеет базовую архитектуру, которая включает в себя минимальный набор инструкций, необходимых для выполнения основных операций.

Существуют компиляторы, такие как GCC и LLVM, которые поддерживают архитектуру RISC-V, что позволяет разработчикам писать программное обеспечение на высокоуровневых языках. RISC-V поддерживается различными операционными системами, включая GNU/Linux, что делает его подходящим для разработки сложных приложений.

В России для высокоскоростной обработки сигналов применялся архитектурный гибридный VLIW/EPIC и ARM в процессоре «Эльбрус». В настоящее время лицензия на ARM заморожена для России, поэтому новые чипы «Эльбрус» переходят полностью на VLIW. ARM-ядро добавляется для совместимости с Android, GNU/Linux и чтобы избежать проблем с оптимизацией VLIW. В качестве альтернативы разработан процессор СКИФ, использующий гибридный RISC-V для управления и VLIW для высокоскоростной обработки сигналов.

Теоретически, процессоры на архитектуре RISC-V могут быть реализованы на различных техпроцессах, включая 350 нм. Хотя 350 нм является устаревшей технологией, она может быть использована для создания простых и недорогих микроконтроллеров или специализированных решений, где высокая производительность не является критически важной.

4. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОРОМ АРХИТЕКТУРЫ RISC V И МИНИ КОМПЬЮТЕРОМ НА ЕГО ОСНОВЕ

Низкоуровневое управление процессором RISC-V включает в себя взаимодействие с архитектурой и инструкциями процессора на уровне, близком к аппаратному обеспечению [6]. Оно может включать в себя программирование на ассемблере, работу с регистрами, управление памятью и обработку прерываний. Технологии низкоуровневого управления достаточно хорошо освоены и новые исследования на первых этапах российской разработки не нужны. Высокоуровневое управление процессором RISC-V [7] включает в себя использование языков программирования и операционных систем, которые упрощают взаимодействие с аппаратным обеспечением. Это позволяет разработчикам сосредоточиться на приложениях, не углубляясь в детали низкоуровневого программирования.

Перечислим основные элементы высокоуровневого управления процессором RISC-V:

1. Языки программирования C/C++: Rust;
2. Операционные системы GNU/Linux, RTOS (Real-Time Operating Systems)
3. Библиотеки и фреймворки
4. Программные интерфейсы (API, Application Programming Interface) и драйверы
5. Инструменты разработки
6. Виртуализация и эмуляция

Основным элементом управления процессором является встроенная операционная система. До сих пор многие процессоры, особенно старые, управляются устаревшими операционными системами. Это могут быть системы с АТ командами или перебором команд с помощью кнопок навигации.

При создании нового перспективного процессора, необходимо сразу закладывать возможность управления с помощью GNU/Linux подобной операционной системы. Она должна поддерживать, как минимум, интерфейс типа «командная строка». Для выполнения прикладных задач в состав мини компьютера на базе разработанного процессора необходимо включить различные компоненты периферии. Эти компоненты должны обеспечивать взаимодействие процессора с окружающей средой и выполнять широкий спектр задач. Периферийные устройства обеспечивают необходимую функциональность и производительность. Их разработка должна вестись параллельно с разработкой мини компьютера.

Программное обеспечение (ПО) играет ключевую роль в функционировании компьютерных систем. Оптимизация ПО может значительно повысить эффективность работы системы, улучшая использование ресурсов и ускоряя выполнение задач. Это особенно важно в условиях ограниченных ресурсов, таких как мини-компьютеры и встраиваемые системы, где каждая единица производительности имеет значение.

Таким образом, требуется обеспечить одновременную разработку и синхронизацию действий в следующих областях:

- разработка топологии процессора
- создание операционной системы для процессора, ее оптимизация
- разработка аппаратной периферии
- разработка новых интерфейсов и протоколов для их подключения.
- разработка драйверов и утилит для аппаратной периферии
- создание прикладного программного обеспечения для широкого круга задач

Для выполнения этих разнородных задач требуется создание нескольких команд разработчиков, которые должны тесно сотрудничать между собой. Эти аспекты требуют комплексного подхода и активного взаимодействия между всеми участниками процесса разработки, чтобы обеспечить успешную реализацию проекта.

5. ОПЕРАЦИОННАЯ СИСТЕМА МИНИ КОМПЬЮТЕРА

Создание первого процессора на базе архитектуры RISC-V с использованием техпроцесса 350 нм на отечественном литографе требует выполнения ряда требований. Ключевой особенностью подобного процессора должна стать система управления на базе операционной системы GNU/Linux [8].

Естественно, что вычислительная мощность подобного процессора не может быть высокой, поэтому полноценное ядро Linux вряд ли может быть скомпилировано и установлено на системной плате на базе такого процессора. Тем не менее, вполне возможно подобрать опции и параметры конфигурации ядра Linux, которое будет работоспособным.

Мини-компьютеры на базе процессоров RISC-V могут управляться различными операционными системами (ОС). Для полноценного функционирования ОС требуется разработка драйверов и утилит для управления периферией. В рамках интеграции с периферийными устройствами должны создаваться новые интерфейсы и протоколы для обеспечения совместимости.

Процессоры RISC-V поддерживают популярные дистрибутивы GNU/Linux, такие как Ubuntu, Fedora, OpenSUSE и Debian [9]. Также существуют специализированные операционные системы, такие как Bianbu OS, которые оптимизированы для работы с архитектурой RISC-V. Операционные системы реального времени (ОСРВ) для архитектуры RISC-V, такие как RT-Thread, FreeRTOS и Embox, обеспечивают поддержку задач с жесткими временными ограничениями. Российская операционная система реального времени JetOS, разрабатываемая ГосНИИАС (Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем) предназначена для авионики и критически важных систем в авиационной промышленности. FreeBSD, OpenBSD и NetBSD действительно поддерживают RISC-V — это важное преимущество для энтузиастов и разработчиков, работающих с этой архитектурой. Однако поддержка RISC-V в BSD-системах пока менее развита, чем в Linux, особенно в плане драйверов и готового софта.

Экосистема Linux значительно мощнее, что является ключевым фактором при выборе ОС для большинства сценариев. Linux имеет несколько значительных преимуществ как операционная система для архитектуры RISC-V. Вот важнейшие из них:

- Linux является открытым программным обеспечением, что позволяет разработчикам и исследователям свободно использовать, изменять и распространять его. Это особенно важно для RISC-V, так как архитектура также является открытой.
- Ядро Linux поддерживает множество аппаратных платформ и устройств, что позволяет использовать RISC-V в различных приложениях, от встраиваемых систем до мощных серверов (масштабируемость).

- Наличие сообщества разработчиков GNU/Linux, которое активно работает над поддержкой RISC-V, что приводит к быстрому развитию и улучшению функциональности.
- Поддержка множества программных пакетов и библиотек, инструментов и сред разработки упрощает разработку и развертывание приложений на RISC-V.
- Множество функций безопасности, таких как управление доступом, шифрование и механизмы защиты от вредоносного ПО
- Поддержка виртуализации, что позволяет запускать несколько разновидностей операционных систем на одном устройстве RISC-V

Особенно явными эти преимущества стали после широкого внедрения ОС Android.

Для развития компетенций по созданию работоспособного дистрибутива GNU/Linux для компьютеров на базе процессора RISC-V требуется собственная команда разработчиков GNU/Linux. При этом особое внимание должно уделяться компетенциям в области разработки ядра Linux. С повышением производительности российского процессора, связанной с технологическим прогрессом и переходом на техпроцессы с более высокими разрешающими способностями, станет возможным компилировать более сложные ядра. Основная задача состоит в оптимизации производительности ядра в зависимости от имеющейся аппаратной базы и требуемого функционала. В ходе этого процесса чрезвычайно важна квалификация разработчиков-программистов.

На этом магистральном пути уже обозначились первые существенные трудности. В октябре 2024 года 11 российских разработчиков были исключены из списка ключевых разработчиков ядра Linux [10]. Считается, что исключение связано с международными санкциями. В числе исключённых оказались сотрудники таких компаний, как SberDevices, «Открытая мобильная платформа» (разработчик ОС «Аврора»), NetUp и Metrotek.

В России и до этого были трудности с полноценными разработками исходных кодов ядра, будь то патчи для исправления ошибок и сбоев, предложение собственной новой функциональности для ядра и ее реализация, обеспечение безопасности и оптимизация производительности. Очень много операций по совершенствованию исходного кода не производилась россиянами никогда, данные компетенции сильно ограничены. Пока вклад российских разработчиков можно оценить как фрагментарный. При создании собственной линейки процессоров команда по разработке исходных кодов ядра не менее важна, чем команда по топологии и архитектуре нового процессора. Поэтому необходимо срочно задуматься о создании механизмов поддержки такой команды, включая организационную и финансовую стороны.

Отметим также, что даже минимальное ядро Linux позволяет выполнять широкий спектр задач. Например, включение сетевой поддержки в ядро, превращает мини компьютер в достаточно сложное сетевое устройство, способное выполнять задачи коммутации и маршрутизации. Поэтому роль операционной системы и ее ядра трудно переоценить.

6. ПРОЦЕССОРЫ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

На первом этапе, когда планируется производство процессоров, лучше не ограничиваться в составлении списка прикладных технологий как возможных кандидатов. Тогда можно спокойно, с анализом всех аргументов за и против, обсудить, какие типы процессоров следует разрабатывать в первую очередь. В этом разделе статьи будет положено начало такому обсуждению. Будет предложена и проанализирована прикладная технология для разработки соответствующего процессора. Выбор инфокоммуникационных технологий и проектирование микросхем для них являются важными аспектами для развития микроэлектроники в России.

Начнем с перечня технологий, которые могут быть реализованы на процессорах, произведенных по технологии с разрешающей способностью 350 нм. Процессоры, произведенные по техпроцессу 350 нм, ограничены в производительности и функциональности по сравнению с

современными решениями. Тем не менее, они все еще могут быть использованы в ряде приложений, где не требуется высокая вычислительная мощность.

Области применения:

- Автомобильная электроника
- Промышленная автоматизация:
- Системы безопасности:
- Умные устройства: IoT-устройствах для сбора данных и управления
- Системы управления энергией:
- Медицинская электроника:
- Системы мониторинга окружающей среды:

Среди возможных технологий, кандидатов на производство собственной линейки процессоров, выделим стандарт DECT. Это телекоммуникационный стандарт для локальных нужд, который был разработан для использования в беспроводных телефонах, но со временем нашел применение и в других областях, включая локальные сети и системы передачи данных. В данной статье используется понятие стандарт для локальных нужд, который включают услуги по передаче голоса и низкоскоростных данных от устройств Интернета вещей.

Технология DECT переживает второе рождение благодаря растущему интересу к Интернету вещей (IoT) [11]. Хотя DECT изначально была разработана для беспроводной телефонии, её характеристики делают её подходящей для различных IoT приложений [12].

Этот стандарт обеспечивает стабильную связь на значительных расстояниях, обычно до 300 метров в помещениях и до 600 метров на открытом воздухе. Это делает DECT идеальным для использования в офисах, на складах и в других больших пространствах, где требуется надежная беспроводная связь.

Скорости передачи данных в системах DECT обычно варьируются в зависимости от конкретной реализации и используемого профиля. В новом стандарте DECT ULE максимальная скорость передачи данных может достигать 1,152 Мбит/с [13]. Однако в реальных условиях эта скорость всегда ниже из-за различных факторов, таких как расстояние, наличие препятствий и количество подключенных устройств. Для большинства приложений, использующих DECT, можно ожидать скорости передачи данных в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен килобит в секунду.

DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) использует обособленный диапазон частот 1880–1900 МГц в Европе [14]. Это принципиально важно, так как в современных условиях на территории многих предприятий действуют системы радиоэлектронной борьбы, которые затрудняют применение стандартных сотовых сетей для передачи голоса и данных. В этом случае технологии, такие как DECT, могут оказаться более эффективными, поскольку они работают в обособленном диапазоне частот и могут быть менее подвержены воздействиям РЭБ.

Кроме того, DECT-системы могут быть настроены для работы в условиях помех, что делает их подходящими для использования на предприятиях, где важна безопасность и стабильность связи. Важно отметить, что DECT поддерживает шифрование данных, что повышает уровень безопасности при передаче информации. В новых стандартах применяются более современные алгоритмы (например, AES-128), при разработке архитектуры чипа можно заменить модуль шифрования на российский.

На российском рынке IoT представлено множество конкурирующих технологий построения IoT сетей, большинство из которых основаны на проприетарных решениях [15]. К наиболее популярным можно отнести LoRa (Long Range) [16] – это одна из технологий семейства LPWAN (Low power Wide-area Network) [17]. Платформы Sigfox [18] тоже является про-

приетарной и предоставляется как готовое решение. Примером российской технологии является «Стриж» [19], которая создана на базе проприетарного узкополосного протокола XNB (Extended Narrowband) и полностью контролируется разработчиком. Альтернативные решения, такие как NB-IoT и LTE-M работают в сетях сотовых операторов [20].

Комбинирование технологий DECT и LoRaWAN в сертифицированной системе «Гудвин-Нева» позволило создать эффективную и надежную инфраструктуру для обеспечения безопасности на предприятиях с особыми условиями [21]. Но даже в этой системе для сбора данных с датчиков интернета вещей используется вторая технология LoRaWAN, что значительно усложняет конструкцию системы. Такая ситуация объясняется тем, что передача IoT сообщений поверх DECT затруднена из-за сложностей с настройками. Передача данных в существующих процессорах DECT требует высокой квалификации персонала и разработки новых инструментов.

Система управления в процессорах DECT устаревшая, она базируется на использовании AT команд. Поэтому ее функциональность в области передачи данных ограничена. AT-команды предоставляют базовые функции, такие как установка соединения, отправка и получение сообщений, но поддерживают не все сложные сценарии передачи данных или управления. Например, мы с большим трудом смогли считать текст сообщения с абонентского устройства DECT, присоединённого по порту RS232 к управляющему компьютеру. Современные технологии передачи данных, такие как IP, MQTT и другие, предлагают более гибкие и мощные возможности для управления и передачи данных, которые могут быть недоступны через AT-команды.

Если будет принято решение об реновации стандарта DECT, то его реализация должна включать работу в нескольких направлениях. Это и

- разработка новой топологии процессора на основе архитектуры RISC V,
- адаптация операционной системы GNU/Linux к новой архитектуре,
- разработка программного обеспечения, управляющего прикладным уровнем стандарта DECT,
- создание новых программных и аппаратных интерфейсов для подключения устройств интернета вещей.

Это достаточно сложные задачи, они требуют не только финансовые вложения, но и время, усилия команды, а также наличие необходимых технологий и инструментов.

В ходе выполнения этих задач неизбежно появится необходимость в создании собственных спецификаций и стандартов, так как устаревшие процессоры не могут выполнять новые требования к DECT. Собственные разработки помогут занять узаконенное место в правовом поле. При условии защиты своих разработок авторскими правами, как на уровне топологии кристалла, так и программного обеспечения, а также внесении дополнений в технологию передачи данных, можно получить независимое от сторонних разработчиков решение. Это техническое решение можно развивать далее и использовать его элементы в других проектах. Создание собственных спецификаций и стандартов требует дополнительных усилий и ресурсов, зато может значительно повысить эффективность и конкурентоспособность вашего проекта.

Несмотря на появление первых российских литографов, еще долгое время будет существовать дефицит производственных мощностей и финансирования, да и разрешение технологических процессоров оставляет желать лучшего. Поэтому сейчас необходимо определиться с приоритетами и тщательно отобрать те технологии, процессоры для которых необходимо разрабатывать и производить в первую очередь. На решение задачи по отбору должно уйти минимум времени. Приступать к проектированию необходимо как можно быстрее.

7. ЛИТОГРАФИЯ ДЛЯ ФОТОНИКИ

Литография перестала быть технологией исключительно для микроэлектроники. Сегодня она является краеугольным камнем фотоники, позволяя перейти к практическим приложениям. Без современных методов литографии невозможно создание компактных, эффективных и массовых устройств на основе фотонных технологий, которые революционизируют телекоммуникации, квантовые вычисления, здравоохранение и многие другие области [22].

Микрорельеф — это ключевой элемент устройств фотоники. Если в электронике решающее значение имеют легированные области полупроводников (р-п переходы), то в фотонике ключевую роль играет физическая геометрия материала на микро- и наноуровне [23].

Приведем классификацию технологий формирования микрорельефа [24]

1. Литографические технологии предполагают, что свет определенной длины волны проходит через фотошаблон (маску) и проецируется на кремниевую пластину, покрытую светочувствительным полимером (фоторезистом). Далее растворитель убирает ненужный полимер.
2. Технологии нанесения и осаждения (аддитивные методы) используются для создания рельефа путем добавления материала.
3. Технологии удаления материала (Субтрактивные методы) направлены на целенаправленное удаление частей материала с поверхности подложки для формирования требуемого рельефа.
4. Технологии модификации материала (на основе воздействия лазера) изменяют свойства поверхности или объема материала без его полного удаления или добавления нового слоя.
5. Новые и перспективные методы, к ним можно отнести нанолитографию с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ), наноимпринтную литографию (NIL), самосборку (Self-assembly) [25]:

Среди технологий отечественной литографии в области фотоники наиболее востребованы:

- Проекционная литография, идеальна для создания крупноформатных ДОЭ (дифракционных оптических элементов) с высокой пропускной способностью.
- Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ): Обеспечивает высочайшее разрешение для создания метаповерхностей и нанопотонных схем. Российские установки ЭЛЛ хорошо подходят для этих задач.
- Наноимпринтная литография (НИЛ): После того, как мастер-шаблон создан с помощью ЭЛЛ или проекционной литографии, НИЛ позволяет тиражировать ДОЭ с низкой себестоимостью, что критически важно для коммерциализации.

Ключевой принцип функционирования технологий констатирует, что рабочая длина волны (λ) должна быть значительно больше разрешения литографа. Поэтому основная ниша разработанных литографов включает инфракрасный (ИК) диапазон $\lambda = 1.5 - 10$ и микроволновый/терагерцовый диапазоны. Перечислим типы устройств фотоники, которые можно создавать, опираясь на разработанные технологии:

1. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) для ИК-диапазона
2. Компоненты планарной (интегральной) нанопотоники для телекоммуникаций
3. Компоненты для терагерцового (ТГц) диапазона
4. Специализированные дифракционные структуры (фотонные кристаллы с большой постоянной решётки, плазмонные структуры)

Как и для микропроцессорных технологий необходимо выбрать одно-два устройства фотоники для первоочередного внедрения. Эти устройства должны пользоваться массовым спросом, на их примере следует отработать все производственные процессы.

Представляются перспективными два направления разработок:

- Простые спектрометры на чипе с дифракционной решеткой.
- Интегрированный биохимический сенсор на планарных волноводах

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В России проходят испытания первые отечественные литографы, что означает неизбежное появление новых производственных мощностей. Несмотря на то, что эти литографы используют устаревшие технологические процессы, с их помощью может производиться достаточно большая номенклатура электроники.

Еще одно направление для применения разработанных литографов включает производство элементов фотоники. Производство фотонных элементов предъявляет уникальные требования к литографии, которые зачастую выходят за рамки стандартных процессов микроэлектроники. Разрешение 350 нм позволяет создавать надежные промышленные устройства для современной планарной фотоники, в том числе, коммерчески жизнеспособные и высокопроизводительные фотонные чипы средней и высокой сложности.

В данной статье обсуждаются принципы, которыми необходимо руководствоваться при отборе микропроцессорных технологий для первоочередного производства. Краткий экскурс в историю позволяет определить место технологического процесса с разрешением в 350 нм в общем перечне. Приведенный список процессоров, изготовленных по данному технологическому процессу показывает, что существует немало областей для успешного их применения.

Выбор архитектуры для российского процессора включает в себя рассмотрение различных вариантов, таких как RISC-V, ARM и VLIW, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Но разрешающая способность техпроцесса в 350 нм диктует однозначный выбор архитектуры RISC V, тем более что этот процессор базируется на открытой архитектуре.

При создании нового перспективного процессора, необходимо сразу закладывать возможность управления с помощью GNU/Linux подобной операционной системы. Она должна поддерживать, как минимум, интерфейс типа «командная строка». Программное обеспечение (ПО) играет ключевую роль в функционировании компьютерных систем. Оптимизация ПО может значительно повысить эффективность работы мини компьютера.

Для выполнения прикладных задач в состав мини компьютера на базе разработанного процессора необходимо включать различные компоненты периферии. Эти компоненты должны обеспечивать взаимодействие процессора с окружающим миром и выполнять широкий спектр задач. Среди возможных технологий, кандидатов на производство собственной линейки процессоров выделен стандарт DECT. Эта технология переживает второе рождение благодаря растущему спросу на технологии Интернета вещей.

Реновации стандарта DECT предполагает работу в нескольких направлениях. Это разработка новой топологии процессора на основе архитектуры RISC V, адаптация операционной системы GNU/Linux к новой архитектуре, разработка программного обеспечения, управляющего прикладным уровнем стандарта DECT, создание новых программных и аппаратных интерфейсов для подключения устройств интернета вещей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механик А. Микросхемам готовят отечественную печать // Эксперт, 2022, № 12, стр. 36–41.
2. Zhang Q., et al. New structure transistors for advanced technology node CMOS ICs // National Science Review, 2024, vol. 11, no. 3, pp. nwae008.
3. Liu Y., Ye K., Xu C.Z. Performance evaluation of various RISC processor systems: A case study on ARM, MIPS and RISC-V // International Conference on Cloud Computing. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 61–74.

4. Alkhalefah S., Aurangzeb K. Architectural comparison of VLIW and superscalar processors // International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 147–155.
5. Cui E., Li T., Wei Q. RISC-V instruction set architecture extensions: A survey // IEEE Access, 2023, vol. 11, pp. 24696–24711.
6. Zekany S.A., et al. RISC-V Reward: Building out-of-order processors in a computer architecture design course with an open-source ISA // Proceedings of the 52nd ACM Technical Symposium on Computer Science Education, 2021, pp. 1096–1102.
7. Yoshiya E., Nakanishi T., Isshiki T. RTL design framework for embedded processor by using C++ description // 2021 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). IEEE, 2021, pp. 1208–1211.
8. Valente L., et al. HULK-V: a heterogeneous ultra-low-power Linux capable RISC-V SoC // 2023 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). IEEE, 2023, pp. 1–6.
9. Butler S., et al. An exploration of openness in hardware and software through implementation of a RISC-V based desktop computer // Proceedings of the 18th International Symposium on Open Collaboration, 2022, pp. 1–11.
10. Набиев Н.Ф., Шакирзянова А.А. Современные проблемы и вызовы в мире open source // Вестник науки, 2024, том 2, № 11 (80), стр. 1134–1141.
11. Sukhov A., Sorokin I., Meil D. New life for cordless communication, old regrets for software projects // Communications of the ACM, 2021, vol. 64, no. 10, pp. 6–7.
12. Ebraheem A., Ivanov I. Towards automated and optimal IIoT design // Информатика и автоматизация, 2024, том 23, № 2, стр. 377–406.
13. Kizilirmak R.C., Askarov S. Examination of PHY layer features in DECT-2020 and LTE-M networks // 2024 IEEE 10th Information Technology International Seminar (ITIS). IEEE, 2024, pp. 200–204.
14. Penner M., Nabeel M., Peissig J. URLLC performance evaluation of IMT-2020 candidate technology: DECT-2020 new radio // 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall). IEEE, 2021, pp. 1–7.
15. Туноголовец Д.К. Оценка применимости технологий LoRaWAN для организации резервного канала связи для метеообеспечения аэродромов // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2021, том 17, № 5, стр. 25–31.
16. Alipio M., Bures M. Current testing and performance evaluation methodologies of LoRa and LoRaWAN in IoT applications: Classification, issues, and future directives // Internet of Things, 2024, vol. 25, Art. No. 101053.
17. Islam M., et al. Future industrial applications: Exploring LPWAN-driven IoT protocols // Sensors, 2024, vol. 24, no. 8, Art. No. 2509.
18. Stanco G., et al. On the performance of IoT LPWAN technologies: The case of Sigfox, LoRaWAN and NB-IoT // ICC 2022-IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2022, pp. 2096–2101.
19. Махмутов А.Р., Вульфин А.М., Миронов К.В. Исследование возможностей автономной работы конечных устройств интернета вещей // Системная инженерия и информационные технологии, 2023, том 5, № 1 (10), стр. 41–47.
20. Muteba K.F., Djouani K., Olwal T.O. 5G NB-IoT: Design, considerations, solutions and challenges // Procedia Computer Science, 2022, vol. 198, pp. 86–93.
21. Зиновьева О.М. и др. Цифровизация систем управления промышленной безопасностью в горном деле // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2021, № 2-1, стр. 113–123.
22. Wang H. et al. Two-photon polymerization lithography for optics and photonics: fundamentals, materials, technologies, and applications // Advanced Functional Materials. – 2023. – Т. 33. – №. 39. – С. 2214211.

23. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Butt M.A. Grayscale Lithography and a Brief Introduction to Other Widely Used Lithographic Methods: A State-of-the-Art Review // *Micromachines*, 2024, Vol. 15(11), Art. No. 1321. <https://doi.org/10.3390/mi15111321>.
24. Murzin S. P. Digital Engineering in Diffractive Optics for Precision Laser Processing // *Photonics*. – MDPI, 2025. – Т. 12. – №. 4. – С. 306.
25. Kazanskiy N.L., Khonina S.N. Metasurfaces & prospects of computer optics. *Computer Optics* 2025; 49(3): 349-361. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1627.

Selection principles of microprocessor and photonic technologies for priority production at Russian lithography plants

M. Djeribie, A.M. Sukhov

This paper formulates the principles for selecting microprocessor technologies and elements of diffractive nanophotonics for priority production on Russian lithographs. An attempt has been made to determine priorities in the selection of processor architecture, operating system and application technologies. The choice of RISC V (Reduced Instruction Set Computer) as the preferred architecture of the Russian microprocessor is justified. The control system should be based on the Linux operating system. RISC-V and Linux are examples of open technologies, which are actively developed and used in various fields of computer science. Lithographs with a resolution of 350 nm open up wide possibilities for the development and serial production of high-quality diffractive optics for infrared technology. The DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) standard is highlighted as an application technology. This is a local area telecommunications standard that was developed for wireless telephony, but over time has become widely used in other applications such as data communication systems and local area networks. DECT technology is experiencing a second birth due to the growing interest in the Internet of Things (IoT).

KEYWORDS: Microprocessors for Russian lithographers, architecture selection for Russian processors, technology for applied tasks, DECT standard