САТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

SATBAYEV UNIVERSITY

Цифровая схемотехника

Ержан Асел Ануаркызы,Ph.D., ассоциированный профессор

Assel.yerzhan@satbayev.university

Логические устройства на реальной элементной базе

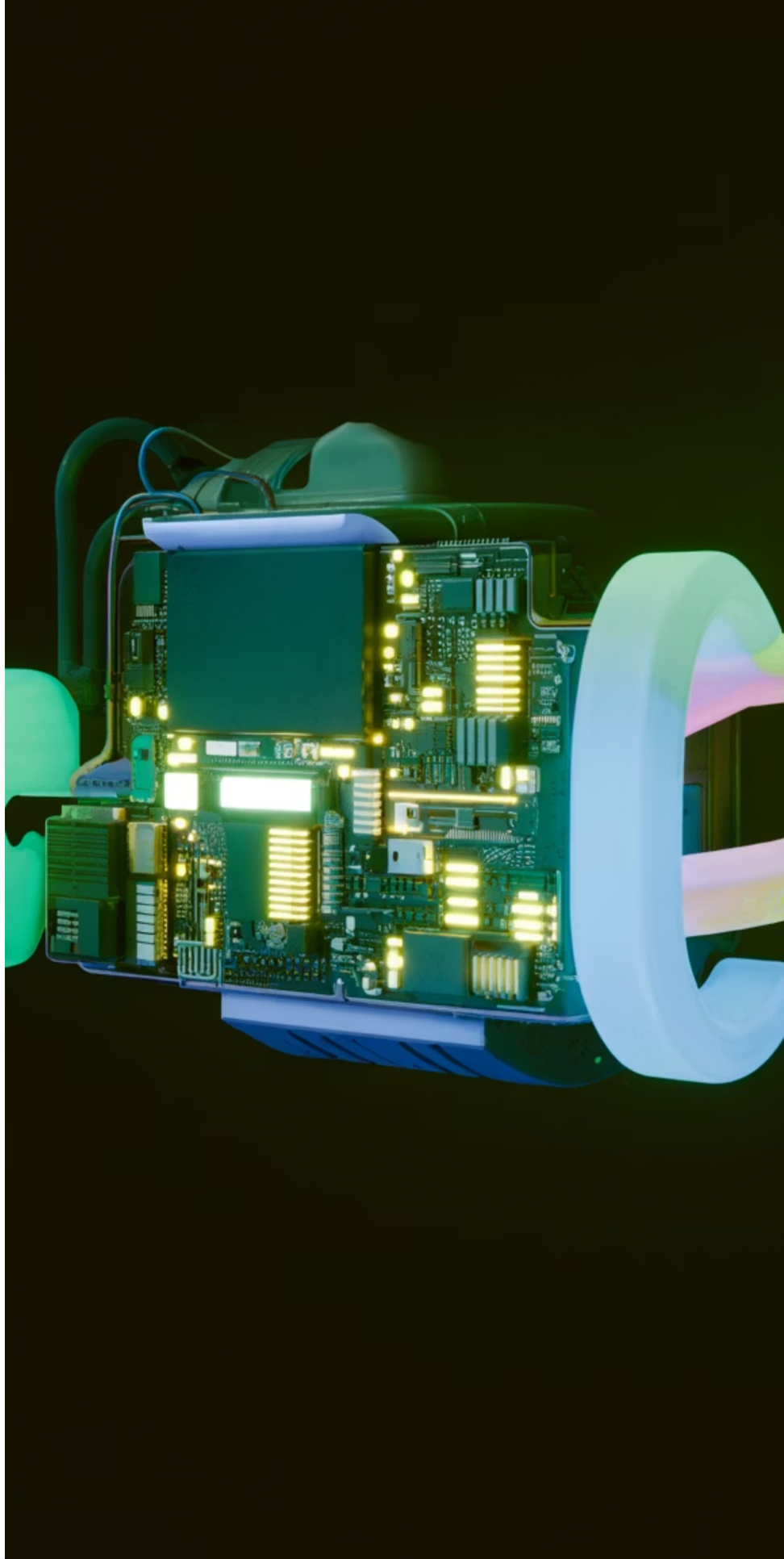
Путешествие от простейших логических элементов — «кирпичиков» цифрового мира — к сложным интегральным схемам, микропроцессорам и системам, которые лежат в основе современной электроники.



ЧАСТЬ 1

Глава 1: Основы цифрового мира

Прежде чем строить здания, нужно понять, из чего сделаны кирпичи. Эта глава закладывает фундамент: что такое логический элемент, какие операции он выполняет и по каким технологиям производится реальная элементная база.



Что такое логический элемент?

Определение

Логический элемент — это электронная схема, реализующая простейшую булеву (логическую) операцию над двоичными сигналами. Входы и выход принимают значения «0» или «1», которые соответствуют определённым уровням напряжения в схеме.

Роль в электронике

Логические элементы являются **основой всех современных цифровых устройств** — от простейшего калькулятора до многоядерного процессора. Из их комбинаций строятся арифметические блоки, регистры, шины данных и целые вычислительные системы.

- Работают с двоичной логикой: «0» и «1»
- Реализуются на транзисторах и диодах
- Объединяются в интегральные схемы

Базовый набор логических операций

И (AND)

Выход равен «1» только тогда, когда **все** входы равны «1». Реализует логическое умножение.

ИЛИ (OR)

Выход равен «1», если **хотя бы один** вход равен «1». Реализует логическое сложение.

НЕ (NOT)

Инвертор: выход всегда **противоположен** входу. Единственный однопортовый элемент.

И-НЕ (NAND)

Универсальный элемент: из одних лишь NAND-элементов можно построить любую логическую функцию. Широко используется в реальных схемах.

Тройка AND, OR, NOT — «классическая» база. Любая сколь угодно сложная логическая функция раскладывается в комбинацию этих операций, что гарантирует функциональную полноту.

Обозначения логических элементов

Прямоугольник с «&»

Элемент И (AND) — отечественный стандарт ГОСТ

Прямоугольник с «≥1»

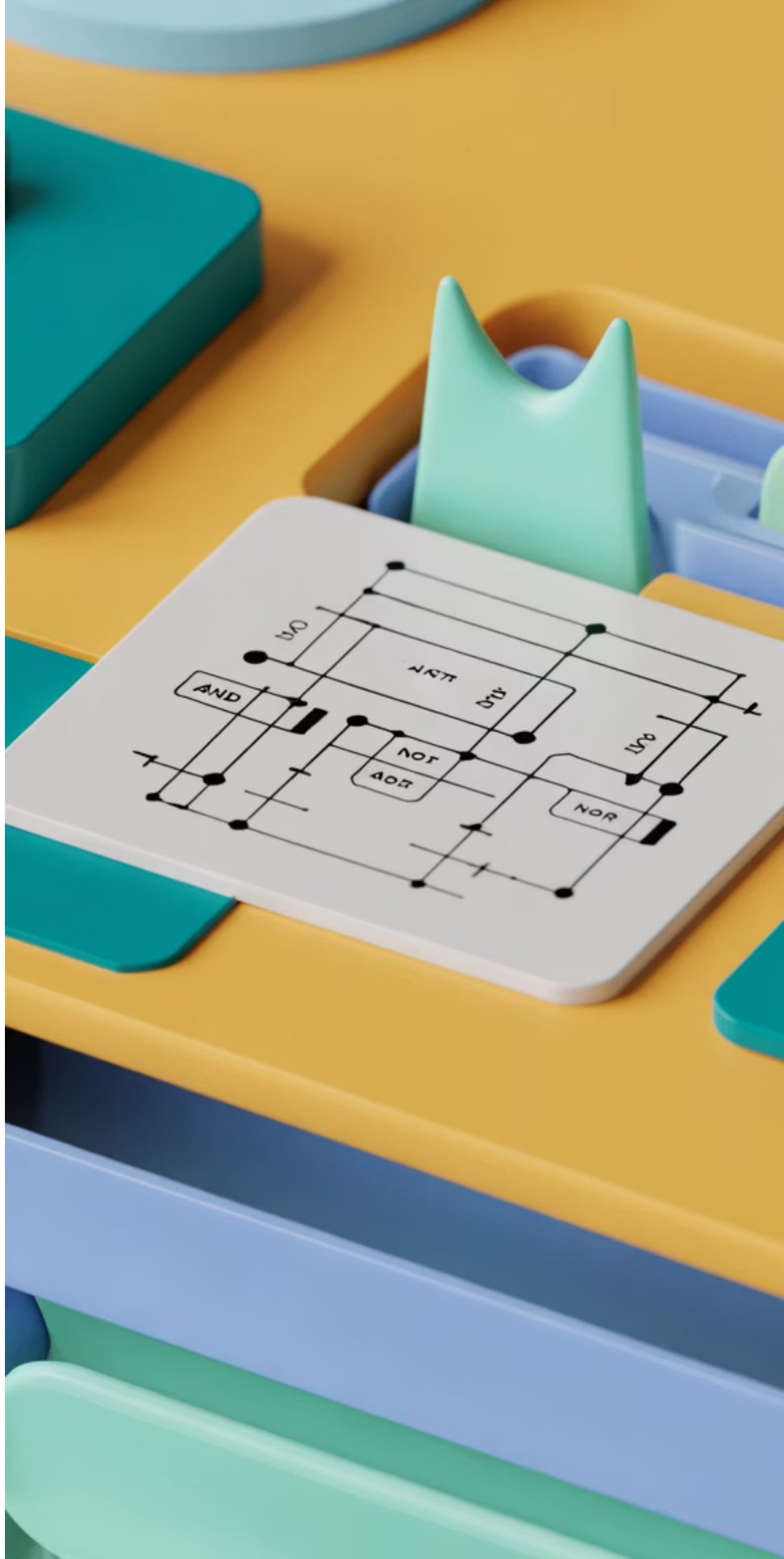
Элемент ИЛИ (OR) — порог срабатывания ≥1

Прямоугольник с «1»

Инвертор НЕ (NOT) — инверсия на выходе

«=1»

Исключающее ИЛИ (XOR) — сумма по модулю 2



Таблицы истинности: Язык логики

Таблица истинности — это формальный инструмент описания логической функции. Она перечисляет выходное значение для **всех возможных комбинаций** входных сигналов. Для элемента с N входами — 2^N строк.

Таблица: элемент И (AND)

Вход A	Вход B	Выход Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица: элемент ИЛИ (OR)

Вход A	Вход B	Выход Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Разнообразие логик: Технологии создания

ТТЛ

Транзисторно-транзисторная логика. Высокое быстродействие, широкое распространение в 1970–80-х годах. Напряжение питания +5 В.

ТТЛШ

ТТЛ с диодами Шоттки. Устраняет насыщение транзисторов — значительно повышает скорость переключения при сохранении совместимости с ТТЛ.

КМОП

Комплементарная МДП-логика. Исключительно низкое статическое энергопотребление, высокая помехоустойчивость. Доминирует в современных схемах.

ЭСЛ / GaAs

Эмиттерно-связанная логика и арсенид-галлиевые схемы — максимальное быстродействие для телекоммуникаций и сверхскоростных вычислений.

Промышленные серии микросхем

Каждая серия объединяет набор микросхем, выполненных по единой технологии, с общими параметрами питания, быстродействием и нагрузочной способностью — что упрощает проектирование устройств.

Серия	Технология	Питание	Особенности
К155	ТТЛ	5 В	Классическая серия, аналог SN74xx
К555	ТТЛШ	5 В	Повышенное быстродействие, аналог 74LSxx
К561	КМОП	3–15 В	Низкое потребление, аналог CD4000
К1533	ТТЛШ (усоверш.)	5 В	Аналог 74ALSxx, высокое быстродействие
74HC/HCT	КМОП	2–6 В	Совместимость с ТТЛ уровнями (HCT)

ЧАСТЬ 2

Глава 2: Типовые функциональные узлы

Из логических элементов собираются «типовые» блоки — сумматоры, дешифраторы, мультиплексоры, триггеры, регистры и счётчики. Именно они становятся стандартными «строительными блоками» для проектирования сложных цифровых систем.



От кирпичиков к зданиям: Эволюция интеграции

1

Отдельные элементы (SSI)

Микросхемы с 1–10 вентилями. Базовые логические операции.

2

Средняя интеграция (MSI)

Сумматоры, дешифраторы, мультиплексоры — готовые функциональные блоки.

3

Большая интеграция (LSI/VLSI)

Микропроцессоры, микроконтроллеры, ПЛИС — полноценные системы на кристалле.

Аналогия из строительства: от отдельного кирпича — к стандартной панели — к готовому зданию. Каждый уровень абстракции повышает производительность труда инженера.

Комбинационные логические устройства

Ключевое свойство

Выходные сигналы комбинационного устройства определяются **исключительно текущим состоянием входов**. Прошлые значения входов не влияют на выход — у схемы нет «памяти».

Примеры комбинационных узлов

- Сумматоры и вычитатели
- Дешифраторы и шифраторы
- Мультиплексоры и демультиплексоры
- Компараторы
- Преобразователи кодов

Описываются таблицей истинности или булевой функцией. Проектируются методами минимизации (карты Карно, метод Квайна–Мак-Класки).

Сумматор: Сердце арифметики

Сумматор — комбинационная схема, выполняющая двоичное сложение. Является основным вычислительным элементом **арифметико-логического устройства (АЛУ)** любого процессора.

Полусумматор (HA)

Складывает 2 однобитных числа. **Входы**: A, B. **Выходы**: S (сумма) и C (перенос). Не учитывает входной перенос.

Полный сумматор (FA)

Складывает 2 бита и входной перенос Cin. **Входы**: A, B, Cin. **Выходы**: S и Cout. Из FA строятся многоразрядные сумматоры.

Параллельный сумматор

N полных сумматоров, соединённых цепочкой переносов. Складывает N-разрядные числа за один такт.

Схема полусумматора

Логические уравнения

S = A ⊕ B — сумма (элемент Исключающее-ИЛИ)

C = A · B — перенос (элемент И)

Таблица истинности

A	B	S	C
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Дешифраторы: Преобразователи кодов

Принцип работы

Дешифратор преобразует N-разрядный двоичный код на входе в активный сигнал на одном из 2^N выходов. Только один выход активен в каждый момент времени.

Применения

- Адресация ячеек памяти
- Выбор периферийных устройств
- Управление дисплеями (7-сегментный)
- Демультиплексирование сигналов

Дешифратор 2-в-4

A1	A0	Y0	Y1	Y2	Y3
0	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0
1	0	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1

Мультиплексоры: Выбор сигнала

Мультиплексор (MUX) — комбинационная схема, которая выбирает один из нескольких входных сигналов и передаёт его на единственный выход. Выбор определяется **адресными (управляющими) входами**.

1

Структура MUX 4-в-1

4 информационных входа D0–D3, 2 адресных входа S0, S1, один выход Y. Адресные входы выбирают, какой из D0–D3 проходит на Y.

2

Применения

Маршрутизация данных по шинам, реализация логических функций, последовательная передача параллельных данных, разделение времени на каналы.

3

Демультиплексор

Обратная операция: один вход распределяется на один из нескольких выходов. Часто реализуется дешифратором с разрешающим входом.

Триггер: Хранитель информации

Что такое триггер?

Триггер — **последовательностная** (с памятью) электронная схема с двумя устойчивыми состояниями: «0» и «1». Состояние зависит не только от текущих входов, но и от предыдущего состояния схемы.

Один триггер хранит **один бит информации**. Это минимальная ячейка памяти цифровой системы.

Отличие от комбинационных схем

В комбинационных схемах выход определяется только текущим входом. В триггере выход зависит от **истории** — предыдущих входных воздействий. Именно это свойство позволяет строить регистры, счётчики и запоминающие устройства.

- Два устойчивых состояния (бистабильность)
- Состояние сохраняется при снятии сигнала
- Управляется импульсами или уровнями

Типы триггеров

RS-триггер

Установка (Set) и сброс (Reset). Простейший тип. Запрещённое состояние при S=R=1. Основа для всех остальных типов.

D-триггер

Данные (Data) защёлкиваются по фронту тактового импульса. Выход Q повторяет D с задержкой на такт. Основа регистров.

T-триггер

Счётный (Toggle). Меняет состояние на противоположное при каждом тактовом импульсе. Основа двоичных счётчиков.

JK-триггер

Универсальный: устанавливает (J=1), сбрасывает (K=1) или переключает (J=K=1). Нет запрещённых состояний.

Схема RS-триггера на элементах И-НЕ

Принцип работы

Два элемента И-НЕ соединены с перекрёстными обратными связями. Выходы Q и $\bar{Q}$ всегда противоположны. Входы **S̄** (установка) и **R̄** — активные нулевые (инвертированные).

Таблица переходов

S̄	R̄	Q	Действие
0	1	1	Установка
1	0	0	Сброс
1	1	Q	Хранение
0	0	—	Запрещено

Регистры: Группы хранителей

Регистр — последовательностная схема из **N триггеров**, предназначенная для хранения N-разрядного двоичного слова. Это основная ячейка временного хранения данных в процессоре.

1

Регистр хранения

D-триггеры с общим тактовым входом. Данные на входе защёлкиваются по фронту CLK и хранятся до следующего тактового импульса.

2

Сдвиговый регистр

Триггеры соединены цепочкой: выход предыдущего — вход следующего. При каждом такте данные сдвигаются. Преобразует параллельный код в последовательный и обратно.

3

Применение

Регистры общего назначения в процессоре, буферные регистры шин, аккумулятор АЛУ, регистры команд и адреса.

Счётчики: Отсчёт импульсов

Принцип работы

Счётчик — последовательностная схема на триггерах, которая изменяет своё состояние (двоичный код) при каждом тактовом импульсе. Хранит текущее число принятых импульсов.

Классификация

- **По направлению**: суммирующий, вычитающий, реверсивный
- **По структуре**: асинхронный (с последовательным переносом), синхронный
- **По модулю**: двоичный (2^N), с произвольным основанием (счётчик по модулю M)

Применения счётчиков

- Подсчёт событий и импульсов
- Генерация временных задержек и интервалов
- Делители частоты
- Адресация памяти в контроллерах
- Формирование развёртки в дисплеях

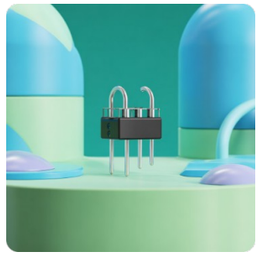


ЧАСТЬ 3

Глава 3: Реальная элементная база

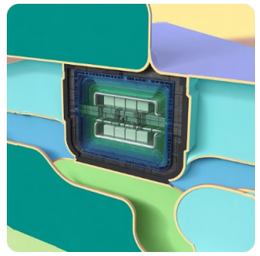
За абстрактными логическими символами стоят конкретные физические устройства — транзисторы, диоды, резисторы, выполненные по различным полупроводниковым технологиям. Понимание элементной базы критически важно для оценки быстродействия, энергопотребления и помехоустойчивости реальных схем.

Транзисторы: Основа современной электроники



Многоэмиттерный транзистор (ТТЛ)

Ключевой элемент ТТЛ-логики. Несколько эмиттеров реализуют функцию И непосредственно в структуре транзистора, сокращая количество компонентов и увеличивая быстродействие.



МДП-транзистор (КМОП)

Полевой транзистор с изолированным затвором. Управляется напряжением, потребляет практически нулевой ток в статике. Основа современных КМОП-схем с топологическими нормами менее 10 нм.

Диоды Шоттки: Ускорение работы

Проблема ТТЛ

В обычной ТТЛ-схеме биполярный транзистор при насыщении накапливает избыточные заряды в базе. Их рассасывание при выключении транзистора занимает время — это ограничивает быстродействие.

Решение: диод Шоттки

Диод Шоттки (металл–полупроводник) подключается между базой и коллектором транзистора. Благодаря малому прямому напряжению (~0,3 В) он шунтирует переход и **не даёт транзистору уйти в насыщение**.

Результат: ТТЛШ-схемы работают в **2–4 раза быстрее** обычных ТТЛ при незначительном увеличении потребления.

КМОП-логика: Энергоэффективность

Принцип комплементарности

Каждый вентиль содержит пару транзисторов: p-канальный (PMOS) и n-канальный (NMOS). Они работают в противофазе: когда один открыт, другой закрыт. Прямой ток через схему протекает только **в момент переключения**.

Энергопотребление

Статическое потребление ≈ 0. Динамическое потребление пропорционально частоте переключений и ёмкости нагрузки: $P = C \cdot V^2 \cdot f$. Именно поэтому снижение напряжения питания с 5 В до 1,2 В даёт **многократную экономию энергии**.

Масштабирование

КМОП-технология масштабируется согласно закону Мура. Современные нормы: 3–7 нм. Один кристалл содержит **десятки миллиардов транзисторов**.

ЭСЛ: Высокая скорость

Принцип работы

В ЭСЛ (эмиттерно-связанной логике) транзисторы **никогда не входят в насыщение**. Переключение происходит за счёт перераспределения тока между плечами дифференциального каскада. Это обеспечивает время переключения вентиля менее 1 нс.

Характеристики и применение

- Задержка распространения: 0,5–2 нс
- Тактовые частоты: до нескольких ГГц
- Высокое потребление тока
- Применение: телекоммуникации, суперкомпьютеры, высокоскоростные АЦП

GaAs: Новые горизонты

Материал

Арсенид галлия (GaAs) — полупроводник III–V группы с подвижностью электронов в 5–6 раз выше, чем у кремния. Позволяет создавать транзисторы с исключительно высоким быстродействием.

Преимущества

Рабочие частоты до сотен ГГц. Низкий уровень шумов. Устойчивость к радиации. Применяется в СВЧ-усилителях, космической и военной электронике.

Ограничения

Высокая стоимость производства. Хрупкость подложки. Сложность интеграции с кремниевыми схемами. Поэтому GaAs применяется в нишевых высокочастотных задачах, а не в массовой цифровой логике.

Масштабы интеграции: От элемента к системе



Закон Мура предсказывал удвоение числа транзисторов на кристалле каждые два года. Это стало двигателем прогресса: первый процессор Intel 4004 (1971) содержал 2 300 транзисторов, современные процессоры — десятки миллиардов.

Микропроцессор: Функционально законченный блок

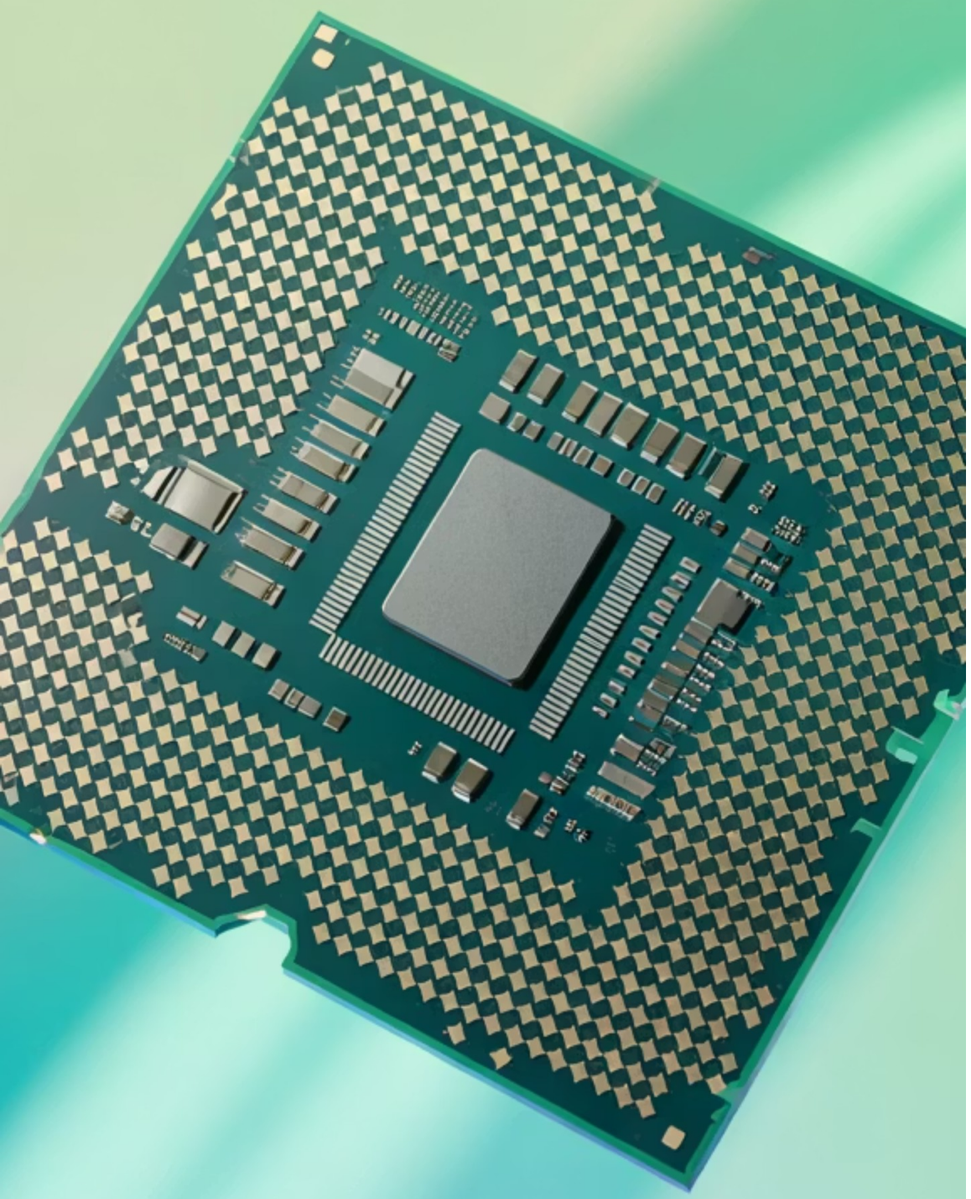
Состав микропроцессора

- Арифметико-логическое устройство (АЛУ)
- Регистровый файл
- Устройство управления (УУ)
- Кэш-память первого и второго уровня
- Блок операций с плавающей точкой (FPU)
- Блоки предсказания ветвлений

Масштаб

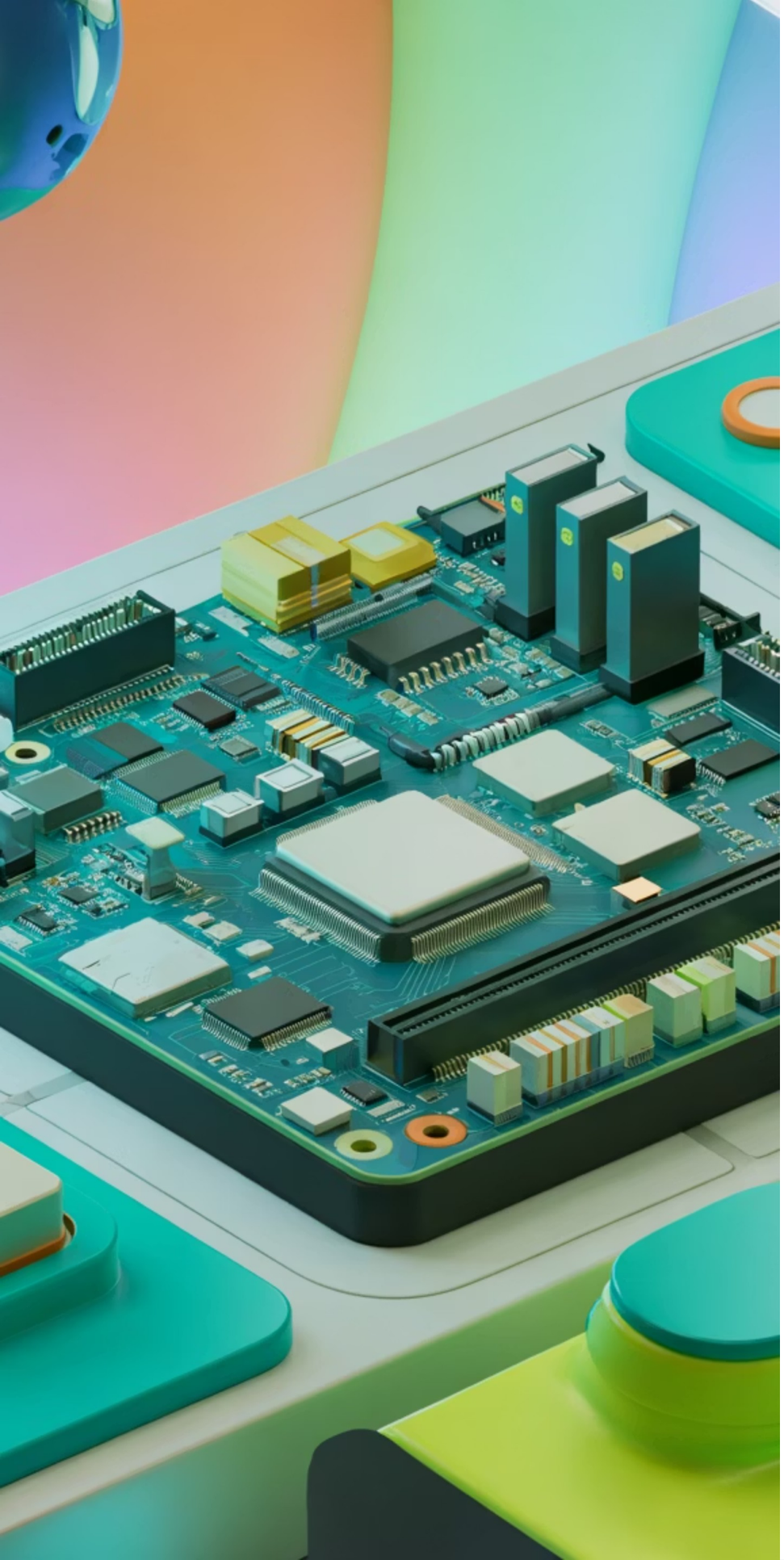
Современные микропроцессоры (Apple M-серия, AMD Zen, Intel Core) содержат **10–100 миллиардов транзисторов** на кристалле площадью ~100–300 мм², изготовленном по нормам 3–7 нм.

Все эти транзисторы — реализация тех самых логических вентилей, триггеров, сумматоров и мультиплексоров, которые мы рассмотрели в предыдущих разделах.



Современный микропроцессор

Кристалл современного процессора — это квинтэссенция всей цифровой электроники. Миллиарды транзисторов, работающих в согласованном ритме на частотах 3–5 ГГц, реализуют алгоритмы, которые были описаны на языке булевой алгебры ещё в XIX веке.



ЧАСТЬ 4

Глава 4: Применение и примеры

Рассмотрим, как типовые функциональные узлы объединяются в реальных системах: от арифметического блока процессора и иерархии памяти до систем управления периферией и повседневных цифровых устройств.

Арифметико-логическое устройство (АЛУ)

АЛУ — центральный вычислительный блок процессора, реализованный на основе описанных нами узлов.

Сумматоры

Многоразрядные параллельные сумматоры с ускоренным переносом выполняют сложение за 1–2 такта.

Логические операции

Побитовые И, ИЛИ, НЕ, XOR реализуются одним слоем вентилей. Используются для маскирования и сравнения данных.

Регистры АЛУ

Входные операнды и результат хранятся в регистрах. Аккумулятор — главный регистр, участвующий в большинстве операций АЛУ.

Мультиплексоры

Выбирают операнды из регистрового файла, направляют результат в нужный регистр или на шину данных.

Память: Хранение информации

Регистровая память

Несколько десятков D-триггеров, доступ за один такт. Регистровый файл процессора: быстрейший тип памяти в иерархии.

SRAM (ОЗУ)

Каждая ячейка — 6 КМОП-транзисторов, образующих два перекрёстно-связанных инвертора (RS-триггер). Быстрая, энергозависимая. Используется в кэш-памяти.

DRAM

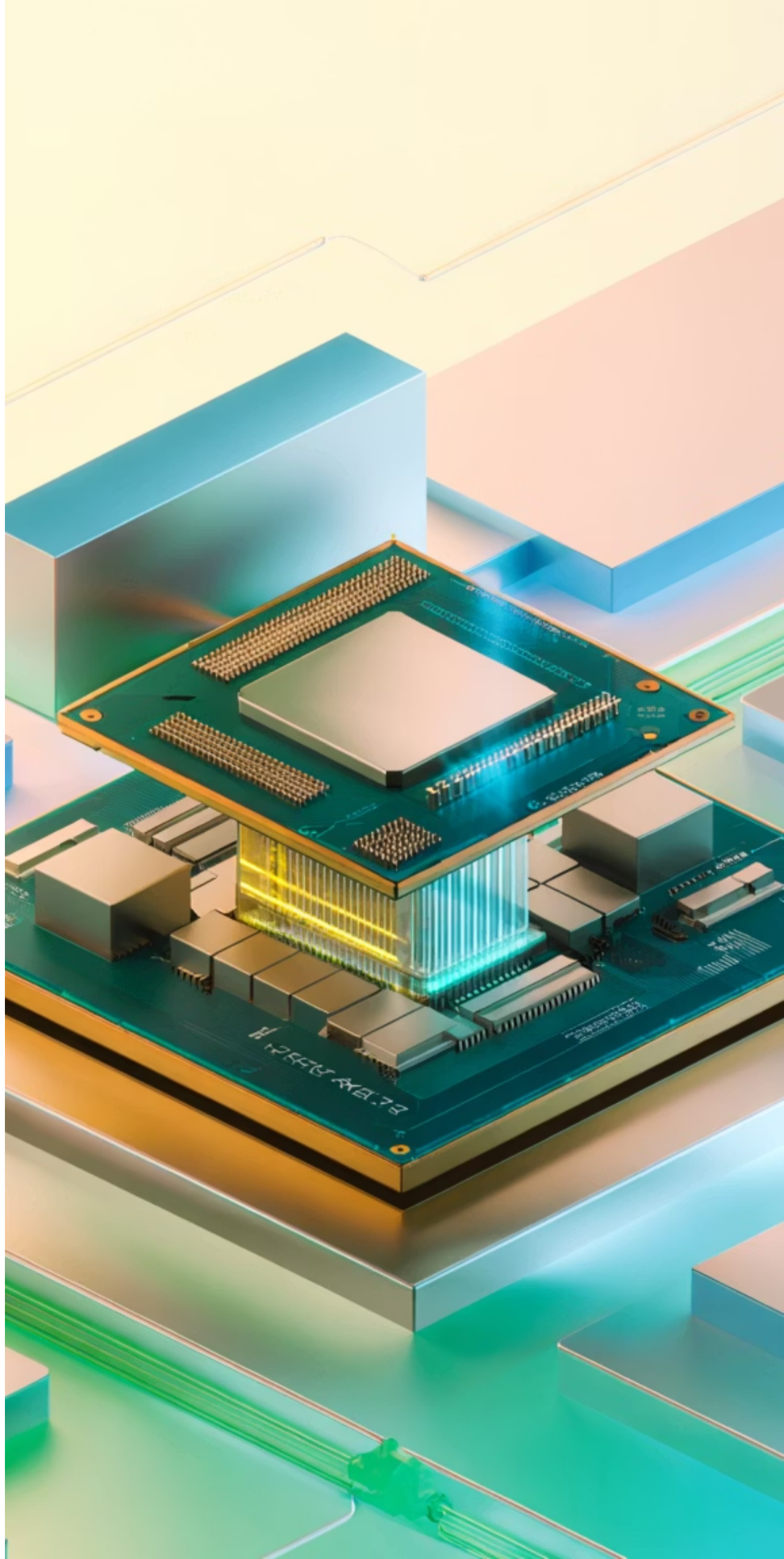
Ячейка — 1 транзистор + 1 конденсатор. Высокая плотность, требует регенерации заряда. Основа оперативной памяти компьютеров.

ПЗУ / Flash

Энергонезависимая память. Хранит прошивку, BIOS, программный код микроконтроллеров. На основе МДП-транзисторов с плавающим затвором.

Блок-схема процессора

На схеме выделены ключевые блоки: **АЛУ** (вычисления), **регистровый файл** (хранение операндов), **устройство управления** (декодирование команд), **кэш** (буферная память) и **шины** (передача данных между блоками).



Системы управления

Роль логических узлов в управлении

Дешифраторы, мультиплексоры и триггеры совместно образуют **конечные автоматы** (FSM) — основу устройств управления. Они декодируют команды, управляют периферией и синхронизируют работу подсистем.

Примеры применения

- Контроллер клавиатуры: дешифрирует код нажатой клавиши
- Контроллер прерываний: мультиплексирует запросы от устройств
- Контроллер памяти: управляет адресацией и циклами чтения/записи
- ШИМ-контроллер: формирует импульсы заданной скважности счётчиком
- UART: сдвиговый регистр для последовательной передачи данных

Примеры из жизни



Калькуляторы

Первые применения цифровой логики в массовых устройствах. Содержат АЛУ, регистры и схему управления на нескольких тысячах вентилей.



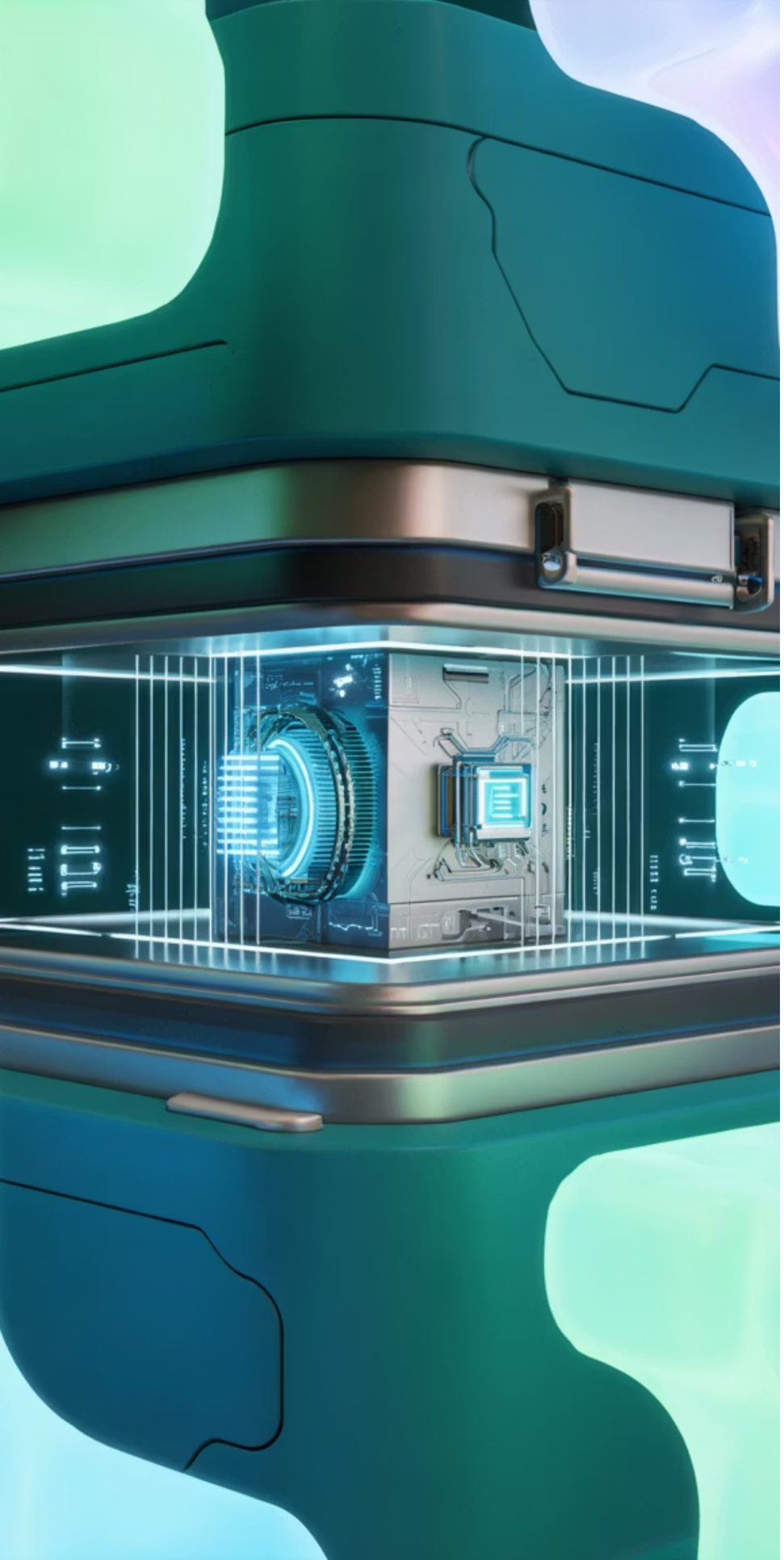
Компьютеры

Миллиарды транзисторов в процессоре, оперативная и постоянная память, контроллеры периферии — всё на тех же базовых принципах.



Смартфоны

Система на кристалле (SoC) объединяет процессор, графический ускоритель, DSP, модем, память на одном кристалле площадью ~100 мм².



ЧАСТЬ 5

Глава 5: Будущее логических устройств

Классическая КМОП-технология приближается к физическим пределам масштабирования. Исследователи ищут новые парадигмы вычислений — квантовые, нейроморфные, оптические — которые могут революционизировать обработку информации.

Квантовые вычисления: Новая парадигма

Кубит вместо бита

Классический бит — 0 или 1. Квантовый бит (кубит) благодаря суперпозиции может находиться в **обоих состояниях одновременно**. N кубитов описывают 2^N состояний параллельно, что потенциально даёт экспоненциальное ускорение для ряда задач.

Применения и ограничения

- Факторизация больших чисел (алгоритм Шора)
- Оптимизационные задачи
- Симуляция молекул для химии и фармацевтики
- Машинное обучение

Проблема: декогеренция кубитов требует охлаждения до ~15 мК. Практические квантовые компьютеры пока содержат сотни кубитов с высоким уровнем ошибок.

Нейроморфные вычисления: Имитация мозга

Архитектура

Массивы искусственных нейронов и синапсов, реализованные аппаратно. Параллельная обработка, как в биологическом мозге. Примеры: Intel Loihi, IBM TrueNorth.

Эффективность

Нейроморфные чипы выполняют задачи распознавания образов и обработки сенсорных данных при энергопотреблении в **1000 раз меньшем**, чем классические процессоры при аналогичных задачах.

Потенциал

Автономные системы с обработкой данных прямо на устройстве (edge AI), умные сенсоры, роботика с адаптивным поведением в реальном времени.



Нейронная сеть: Аппаратная реализация

Современные **нейроморфные чипы** моделируют миллионы искусственных нейронов с пластичными синаптическими весами. Это принципиально иная архитектура: вместо последовательного выполнения инструкций — массивно-параллельная событийно-управляемая обработка сигналов, вдохновлённая работой коры головного мозга.

Оптическая логика: Скорость света

Идея оптических вычислений

Замена электронов фотонами для передачи и обработки информации. Фотоны перемещаются со скоростью света, не создают электромагнитных помех и не рассеивают тепло при распространении по волноводу.

Преимущества и вызовы

- Пропускная способность: сотни ТГц в одном волноводе
- Отсутствие резистивных потерь при передаче
- Параллельная передача по длинам волн (WDM)

Проблема: создание оптических логических вентилей, работающих при комнатной температуре, остаётся исследовательской задачей. Сегодня оптика используется преимущественно для **межсоединений**, а не для вычислений.

Нанотехнологии и новые материалы

Нанометровые нормы

Переход с 10 нм на 3 нм позволил удвоить плотность транзисторов при снижении энергопотребления на 30%. Следующий рубеж — суб-нанометровые нормы и 3D-интеграция.

Графен

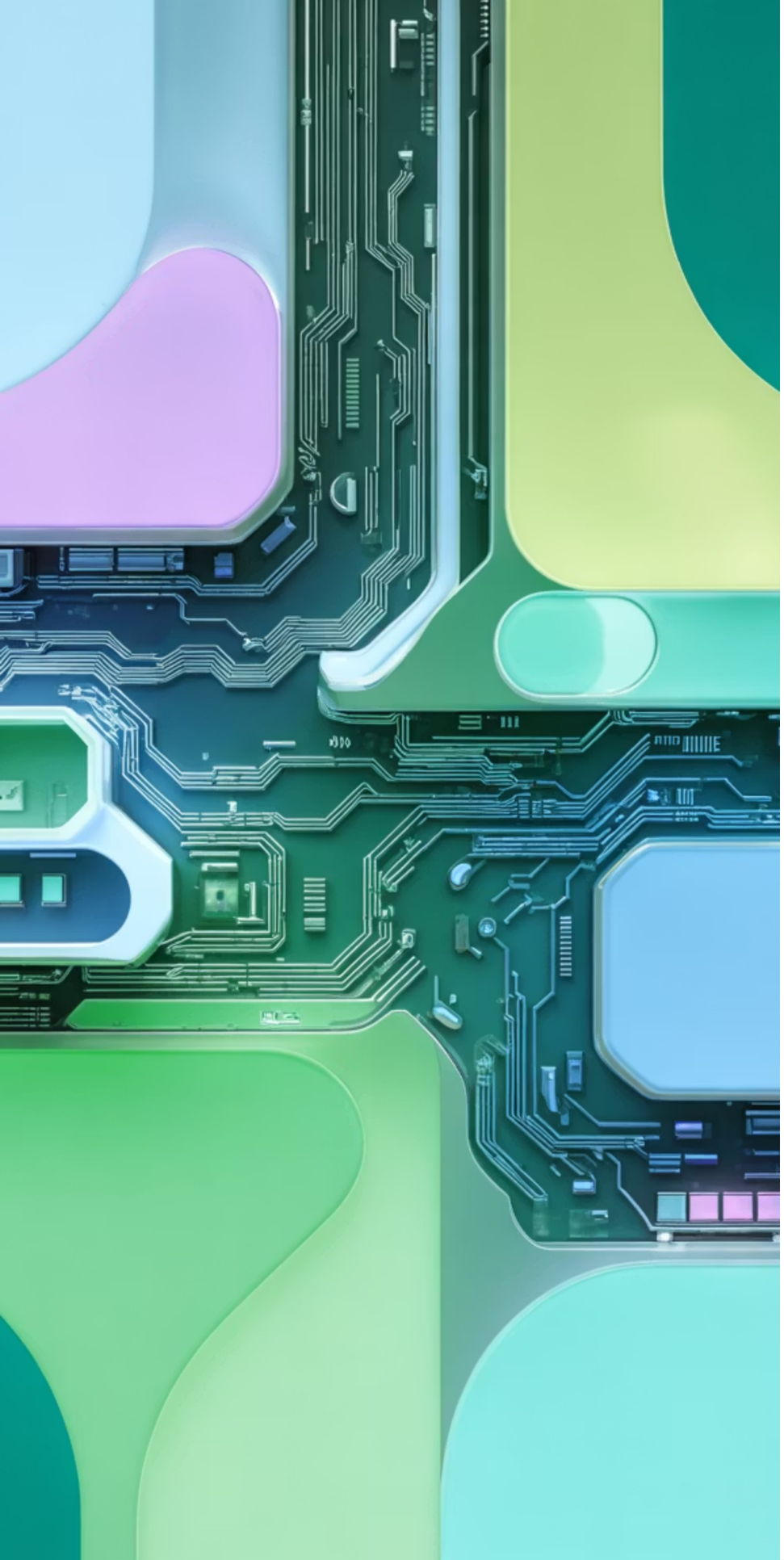
Двумерный материал с исключительной подвижностью носителей. Потенциально позволяет создавать транзисторы с субатомарными затворами, но управление полосой запрещённых состояний остаётся сложной задачей.

3D-интеграция

Вертикальное стекирование кристаллов (3D NAND, HBM-память, Intel Foveros). Позволяет радикально увеличить пропускную способность памяти и сократить задержки в системе.

Carbon Nanotube FET

Транзисторы на углеродных нанотрубках показывают лучшие характеристики по скорости и энергопотреблению, чем кремниевые аналоги той же размерности.



ЧАСТЬ 6

Глава 6: Заключение

Подведём итоги нашего путешествия от простейшего логического вентиля до сверхбольших интегральных схем и перспективных технологий вычислений будущего.

От простого к сложному: Путь развития



Системы

Компьютеры, SoC, ИИ-ускорители

Интегральные схемы

Микропроцессоры, контроллеры, ПЛИС

Функциональные узлы

АЛУ, регистры, счётчики, дешифраторы

Логические элементы

AND, OR, NOT, NAND, XOR — вентили на транзисторах

Каждый уровень абстракции строится строго на предыдущем. Понимание фундамента позволяет уверенно работать на любом уровне иерархии.

Значение для современного мира

Цифровая революция

Всё, что мы называем «цифровой революцией» — интернет, смартфоны, искусственный интеллект, облачные вычисления — стало возможным благодаря последовательному развитию логических элементов и технологий их производства.

Закон Мура обеспечивал экспоненциальный рост производительности более 50 лет, делая вычисления доступными каждому.

Ключевые выводы

- Булева алгебра — математическая основа всей цифровой техники
- Логические вентили — физическая реализация булевых операций
- Функциональные узлы — стандартные блоки проектирования
- Технология (ТТЛ, КМОП, ЭСЛ) определяет скорость и потребление
- Интеграция транзисторов продолжает расти несмотря на физические пределы

Вопросы?

Логические элементы

AND, OR, NOT, NAND, XOR — основа всего

Функциональные узлы

Сумматоры, триггеры, регистры, счётчики

Элементная база

ТТЛ, КМОП, ЭСЛ, GaAs — реальные технологии

Будущее

Квантовые, нейроморфные, оптические системы

