

---

# ЗАКОН МУРА И ЕГО ПРИМЕНИМОСТЬ В ПОСЛЕДНЕЕ ВРЕМЯ

Докладчик: Латыпов Шамиль

# ЗАКОН МУРА

- Закон Мура: количество транзисторов на кристалле интегральной схемы удваивается примерно каждые 12 месяцев
- Гордон Мур сформулировал этот закон в 1965 году
- Развитие техники видно везде – от ПК до медицинского оборудования и автомобилей
- Мы приближаемся к технологическим ограничениям, из-за чего Закон Мура ставится «под вопрос»
- Сегодня исследуются альтернативные подходы и технологии, которые позволят продолжить технологическое развитие в рамках Закона Мура

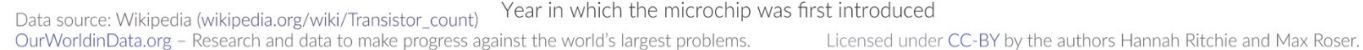
# СОБЛЮДЕНИЕ ЗАКОНА МУРА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

- Миниатюризация: Уменьшение размера транзисторов
- Улучшение технологии Фотолитографии
- Улучшение дизайна и архитектуры чипов
- Экономия энергии

- В 1975-м году закон переформулировали: 12 месяцев увеличили до 24
- 1990-е – уменьшение техпроцесса с 800нм до 180нм
- 2000-е – уменьшение техпроцесса до 45нм к концу десятилетия
- 2010-е – достижение 10нм процессоров
- 5000 транзисторов в 70-х годах до более чем 50млрд в наши дни

Our World  
in Data

## Transistor count



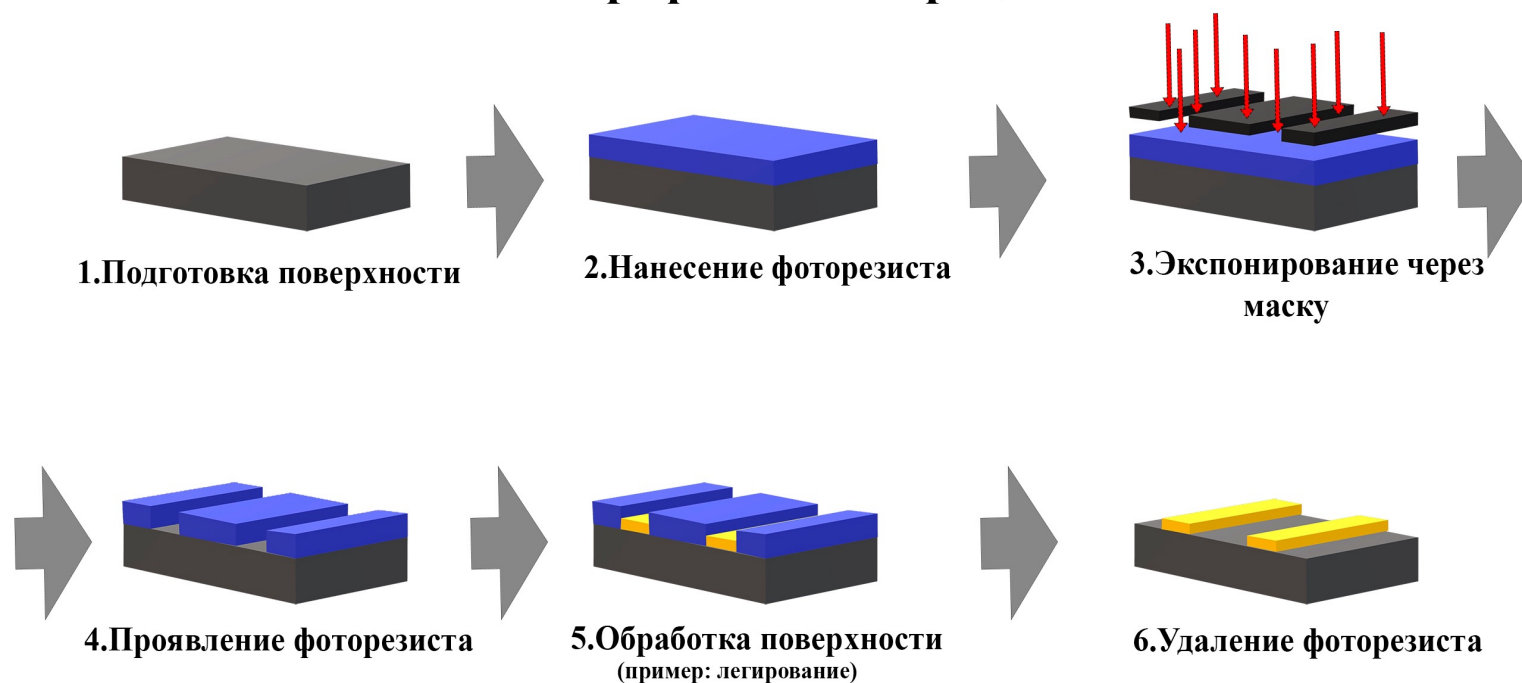
## Зависимость числа транзисторов на кристалле микропроцессора от времени

# ОГРАНИЧЕНИЯ ЗАКОНА МУРА

## ■ Технологические и производственные ограничения

- Сложность производства: уменьшение транзисторов требует новых станков для производства
- Высокие затраты: новые разработки требуют всё больше вложений

## Фотолитографический процесс



# ОГРАНИЧЕНИЯ ЗАКОНА МУРА

- **Физические ограничения**

- Квантовые эффекты: электроны могут вести себя непредсказуемо
- Тепловые проблемы: плотно расположенные транзисторы сильно греются
- Размер транзистора: размер атома = ограничение снизу

- **Архитектурные ограничения**

- Закон «убывающей отдачи»: от многократного увеличения кол-ва транзисторов улучшение производительности становится менее заметным
- Ограничение однопоточной производительности: многоядерность не всегда приводит к пропорциональному увеличению производительности

- **Экология и энергия**

- Потребление энергии: процессоры всё больше потребляют энергии
- Утилизация мусора: старое и больше ненужное оборудование

# РЕАКЦИЯ КОМПАНИЙ НА ДОСТИЖЕНИЕ ЛИМИТОВ

- **Инновации вне Закона Мура:** Многоядерность, конкретика при выполнении задач, оптимизация ПО
- **Альтернативные материалы и технологии:** IBM продолжает исследования графена и других материалов в качестве альтернативы кремнию
- **Новые архитектуры процессоров:** AMD внедряет технологию чиплетов в свои процессоры. Чиплет - микросхема, специально разработанная для совместной работы с другими себе подобными
- **Оптимизация ПО:** Google и другие компании инвестируют в разработку и оптимизацию различных алгоритмов, в том числе ML
- **Квантовые и Нейроморфные технологии:** Intel продолжает развитие квантовых вычислений, а NVIDIA исследует нейроморфные системы, имитирующих работу мозга
- **Инвестиции:** Страны запускают государственные программы для стимулирования исследований и новых разработок

# ПОСЛЕДСТВИЯ ДОСТИЖЕНИЯ «ПРЕДЕЛА» ЗАКОНА МУРА

- **Ограничения вычислительной мощности:** методы увеличения производительности станут менее эффективными.
- **Производственные проблемы**
  - Сложность производства: новые материалы и технологии могут стать сложными для производства. А также увеличение брака и дефектов.
  - Нехватка ресурсов: альтернативные материалы могут быть ограничены в количестве.
- **Экономические проблемы**
  - Высокие затраты: поиск новых решений требует инвестиции
  - Повышение стоимости производства: новые технологии могут увеличить стоимость производства; увеличение брака и дефектов потребуют больше финансирования со стороны мониторинга и проверок качества; многие компании не «выдерживают» таких материальных затрат и переквалифицируются/закрываются

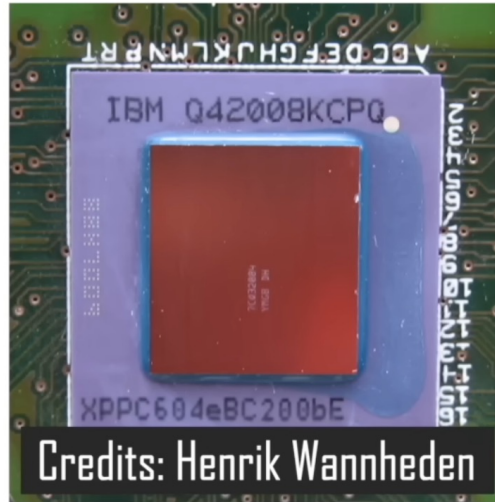




# НОВЫЕ СТРАТЕГИИ И ПОДХОДЫ К ПРОИЗВОДСТВУ ПРОЦЕССОРОВ

# 1) СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ

- Вместо одного типа процессора используется несколько разных.  
«Гетерогенные» вычисления
- Плюсы: не требуют инноваций при современных разработках

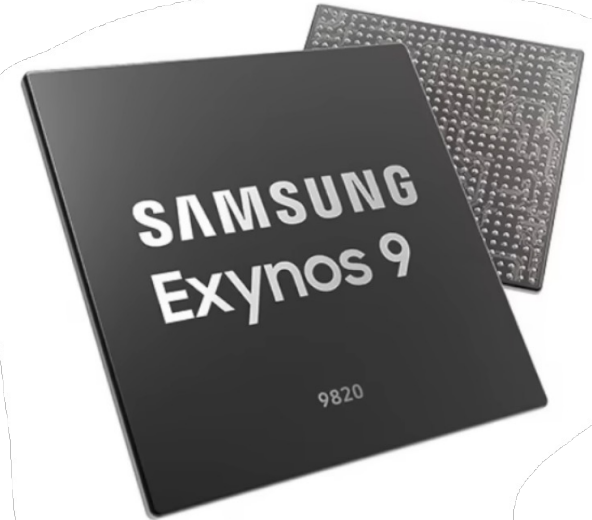


## CPU

Central  
Processing  
Unit

## GPU

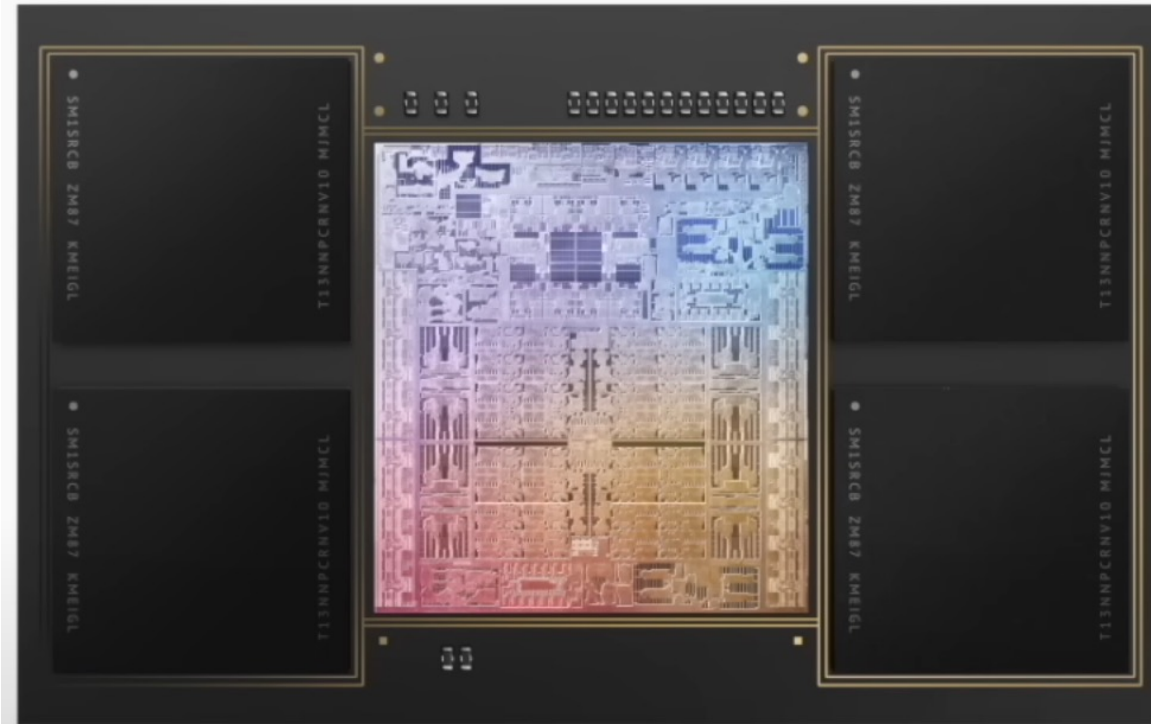
Graphics  
Processing  
Unit



## NPU

Neural  
Processing  
Unit

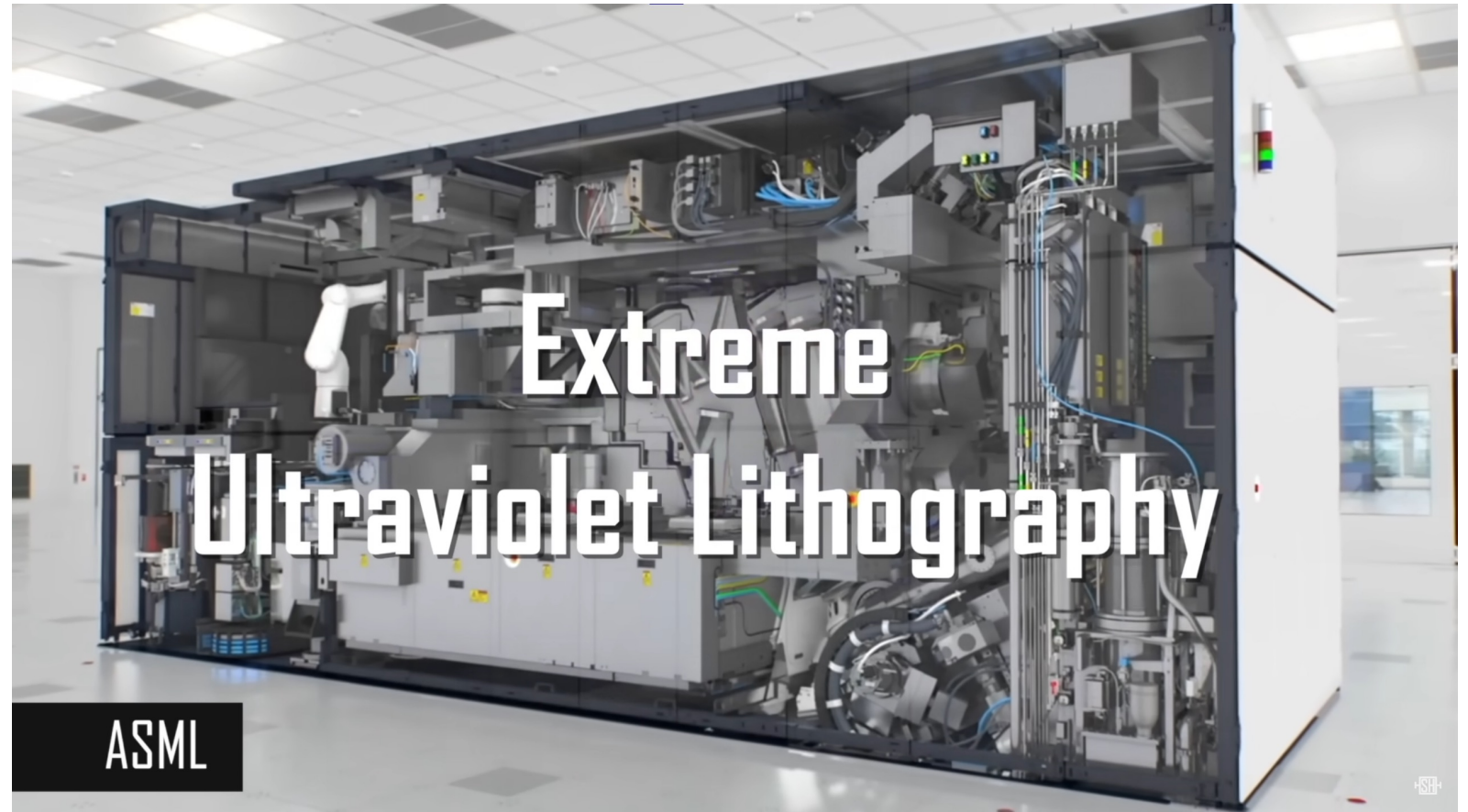
# APPLE M1



Credits: Apple

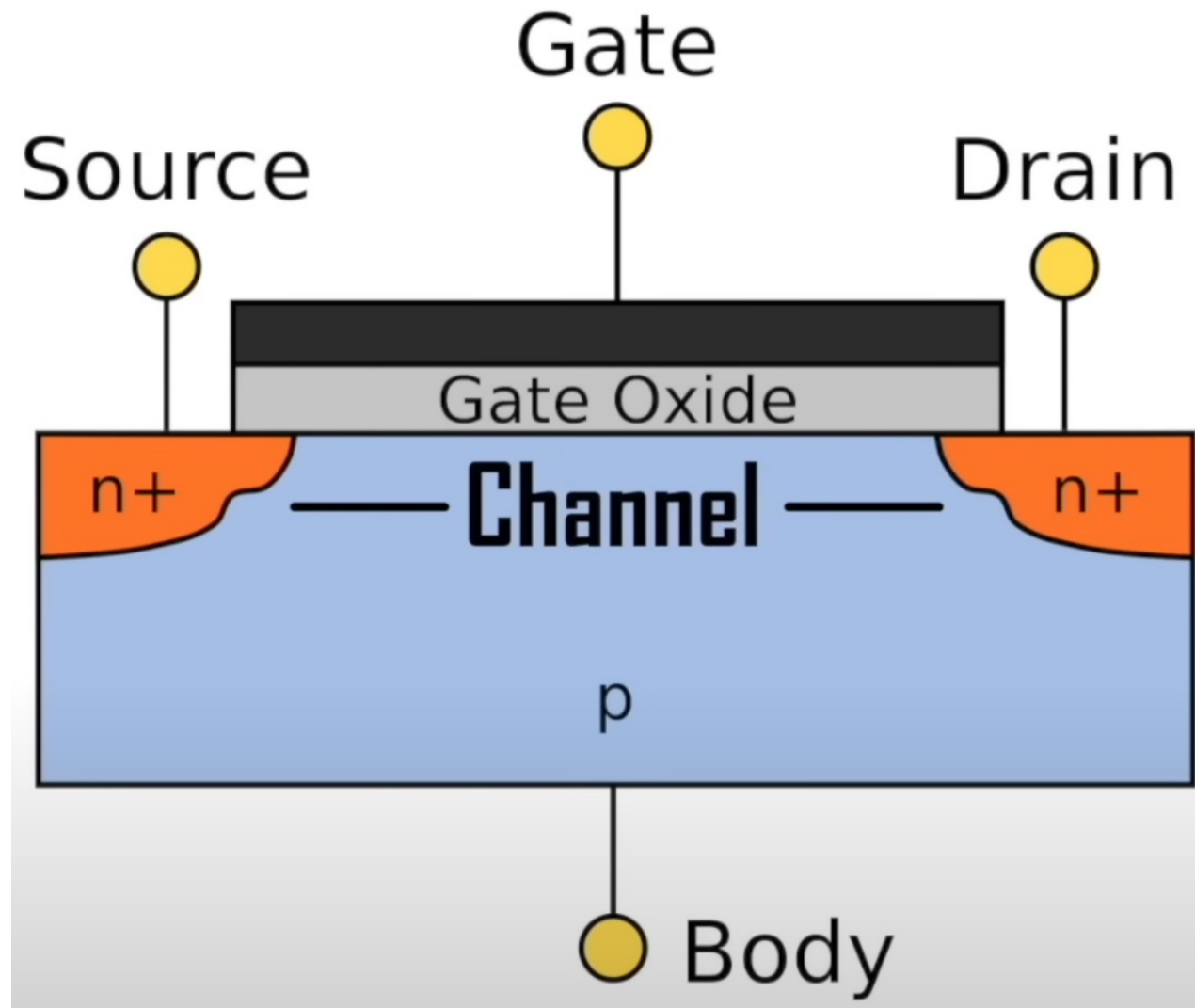
## 2) УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Длина волны 13.5 нм позволяет создавать более мелкие объекты
- Это сложный и дорогой процесс
- Процесс ультрафиолетовой литографии проходит медленнее традиционных методов



### 3) 3D АРХИТЕКТУРА

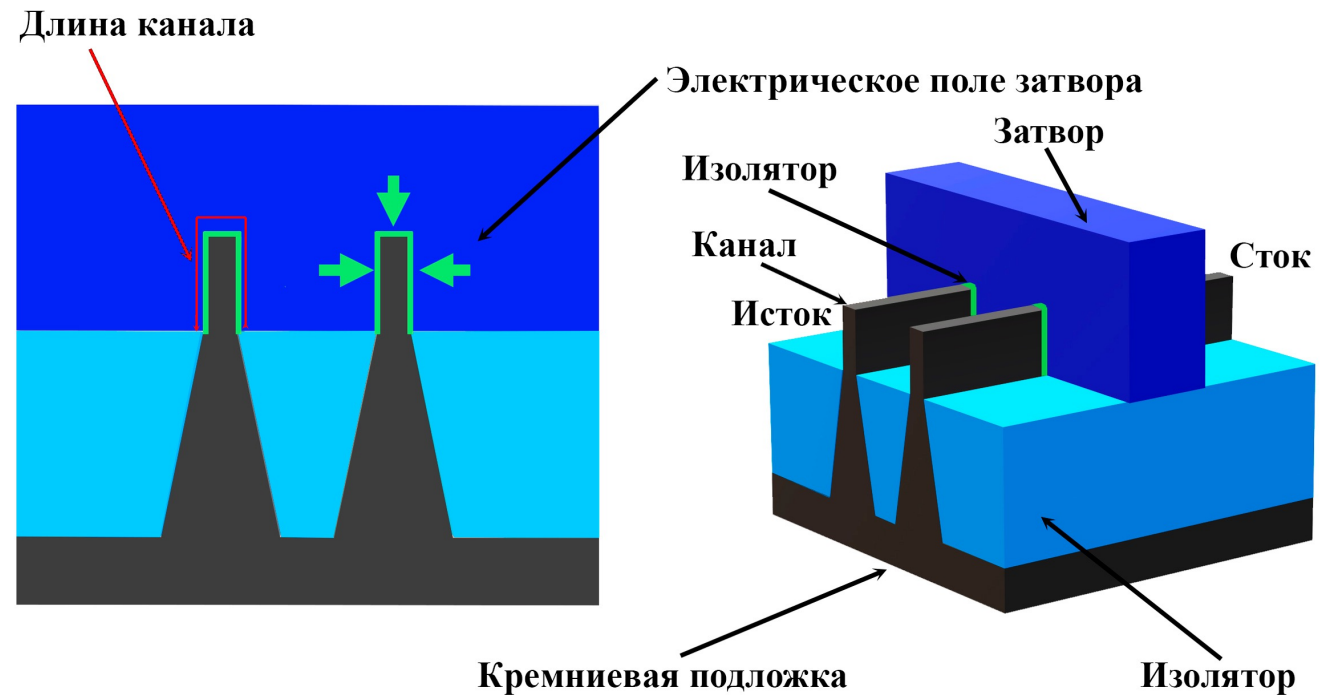
- Транзистор выступает в роли переключателя для электричества
- Раньше транзисторы печатались на плоской поверхности
- Транзисторы типа Fin-FET имеют «объемный» проводящий канал
- Архитектура GAAFET находится в разработке



# FIN-FET

- Проводящий канал вне плоскости «источника» и «стока»
- Это улучшает тепловыделение, снижает электропотребление и ускоряет операции

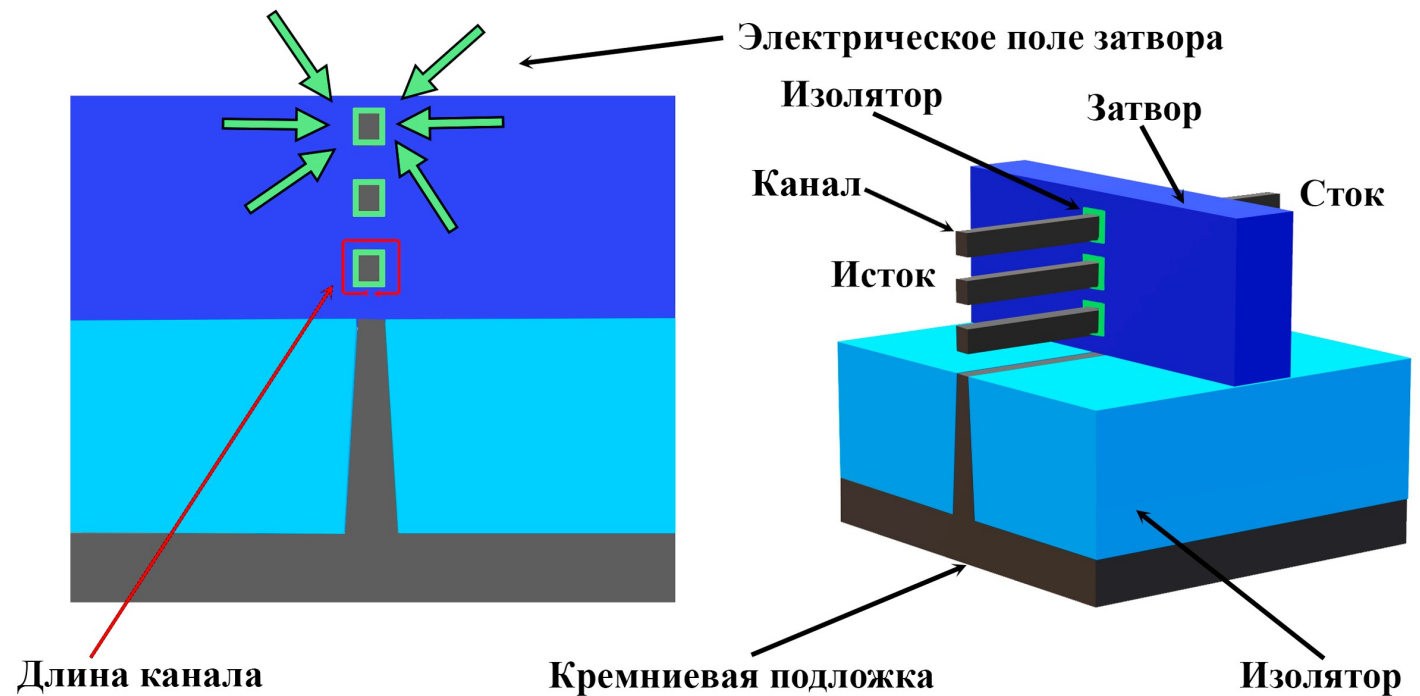
**FinFET**  
(упрощенная модель)



# GAAFET

- Технология пока в разработке
- Затвор «огibt» канал
- Следующий шаг – сложить транзисторы друг на друга
- Минусы: перегрев из-за плохого теплоотвода

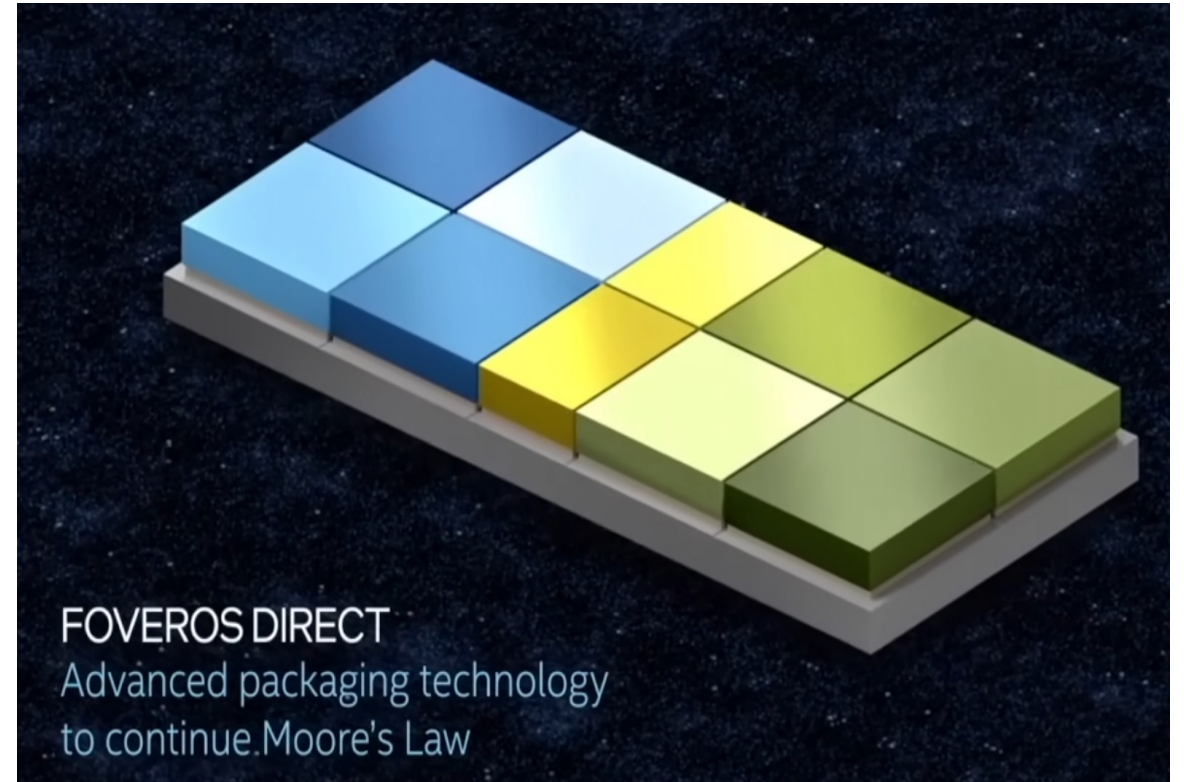
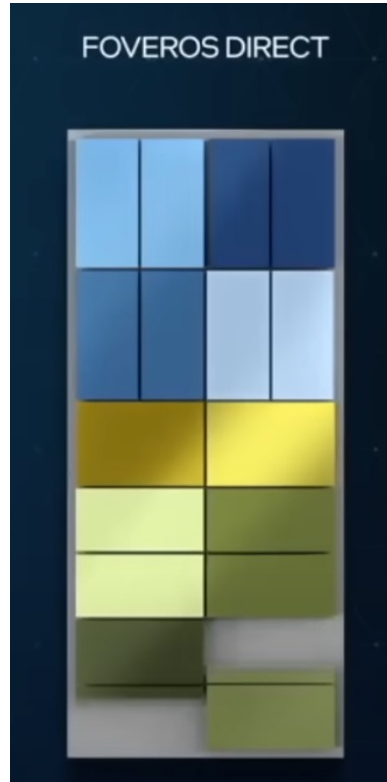
## GAAFET (упрощенная модель)





# ЧИП INTEL

- Новая технология 3D укладки
- Работы идут над 4й итерацией этой технологии
- Ожидание появления на рынке – конец 2023

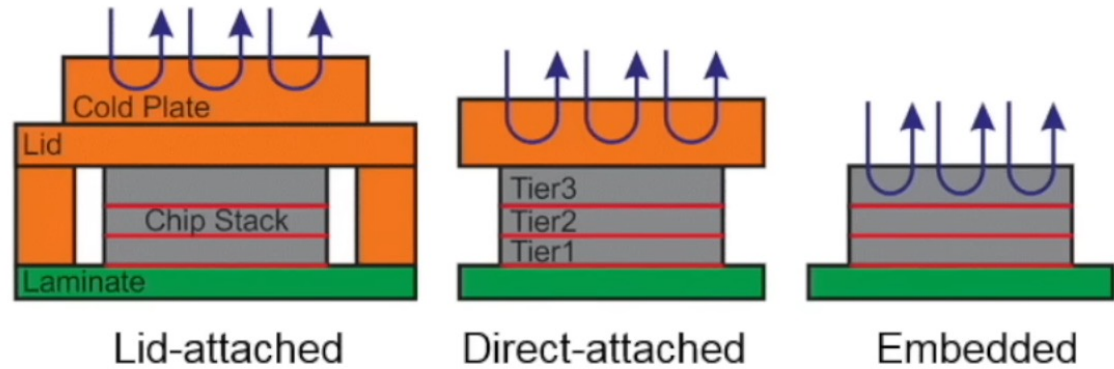




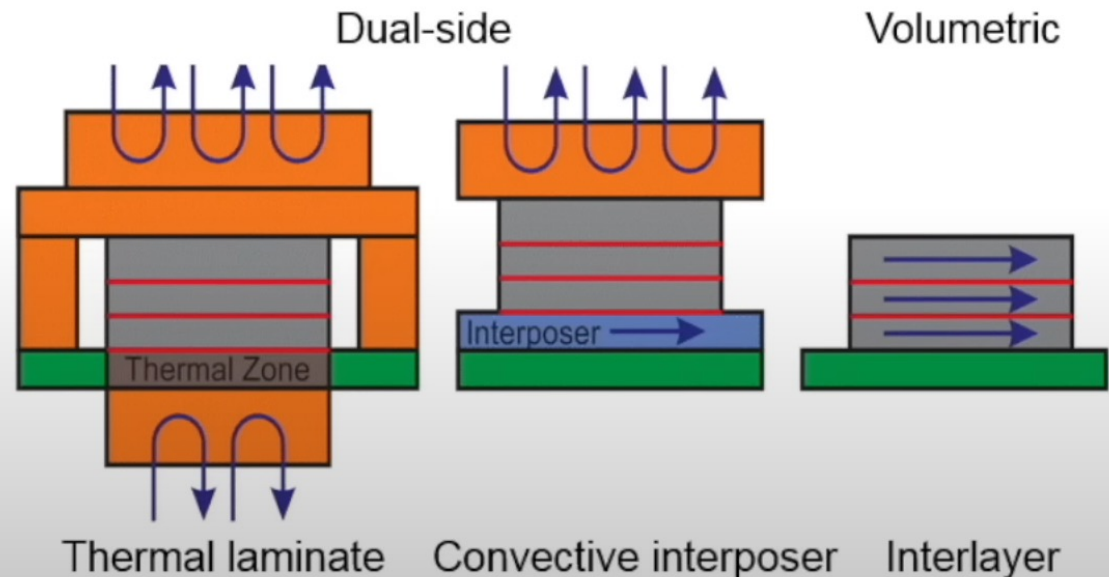
# ОХЛАЖДЕНИЕ

- Новый тип охлаждения прямо через микросхемы
- Увеличивает риски поломок и протечек, а также усложняет производство
- Увеличивает размер транзисторов, что противоречит изначально поставленной задаче по их уменьшению

## Back-side cooling evolution



## Disruptive cooling approaches



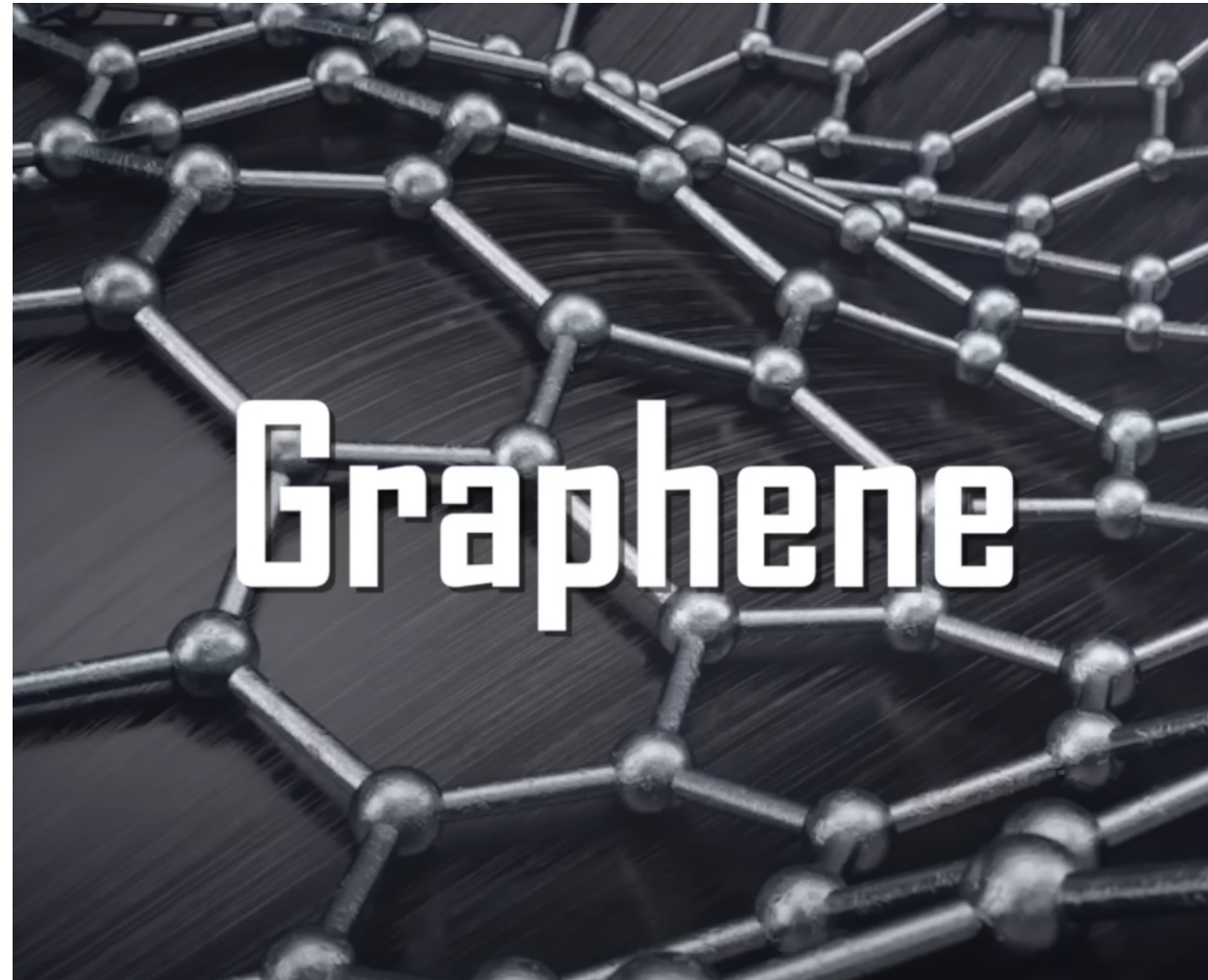
#### 4) ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

- Кремний – традиционный материал для изготовления чипов
- Графен – кандидат номер один на его замену



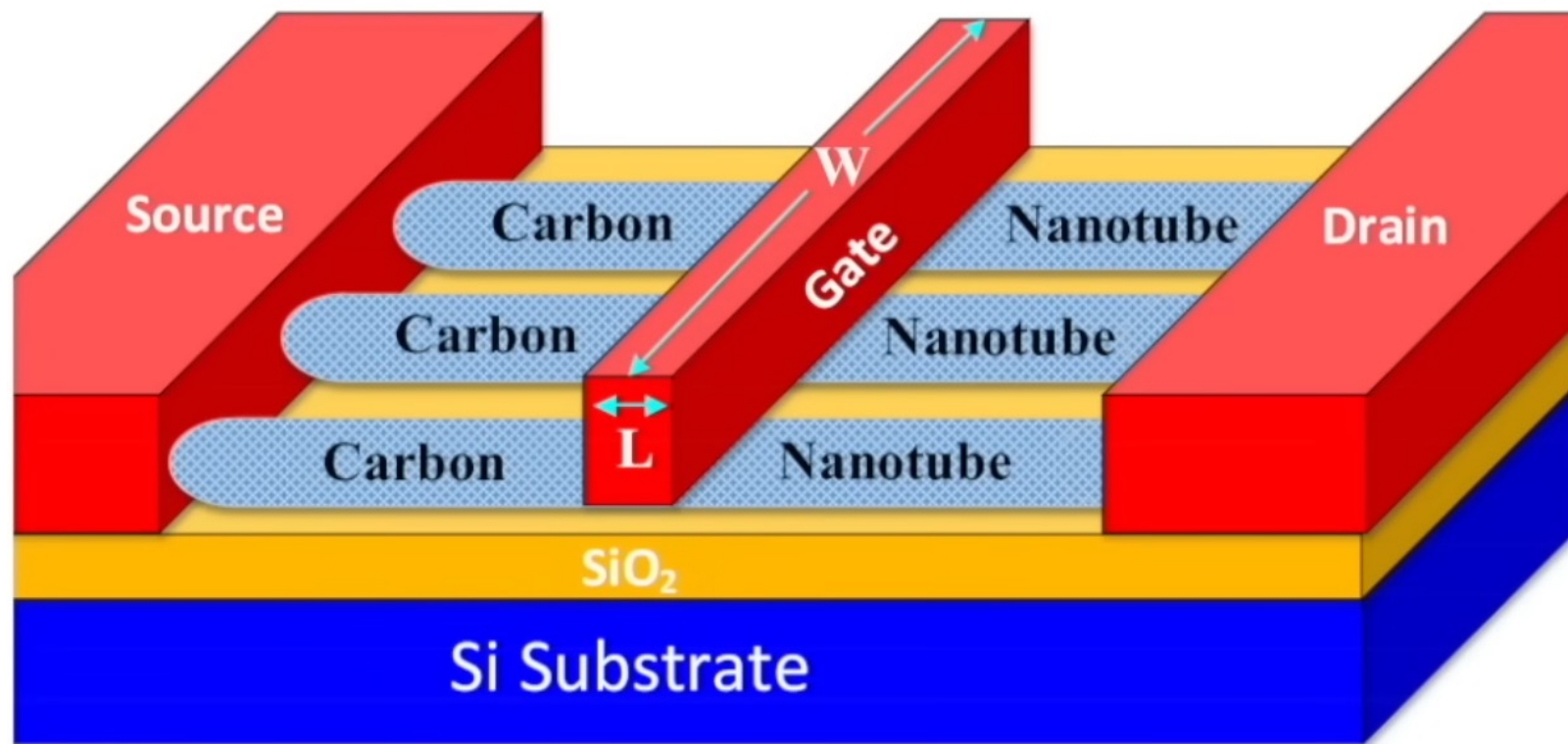
## ГРАФЕН

- Одиночный слой атомов в виде сетки
- Был открыт в 2004
- Имеет плохую ширину «запрещенной зоны» (область значения энергии, которыми не может обладать электрон в идеальном кристалле)

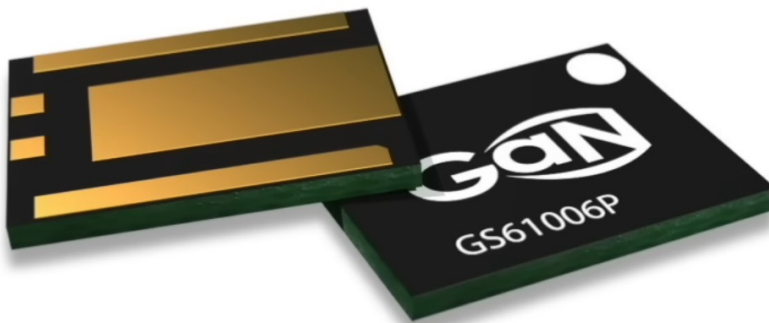


## УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ ГРАФЕНА

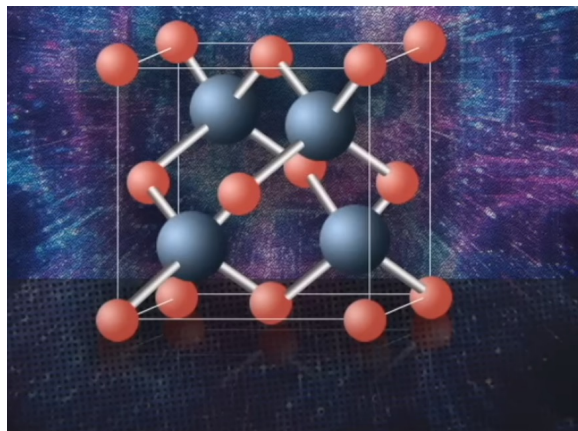
- Добавить второй слой другого материала или деформировать графен
- Свернуть в углеродные нанотрубки, которые могут иметь разные свойства проводимости



# ДРУГИЕ МАТЕРИАЛЫ, КОТОРЫЕ НЕ ПОДОШЛИ ПОД ЗАМЕНУ КРЕМНИЯ

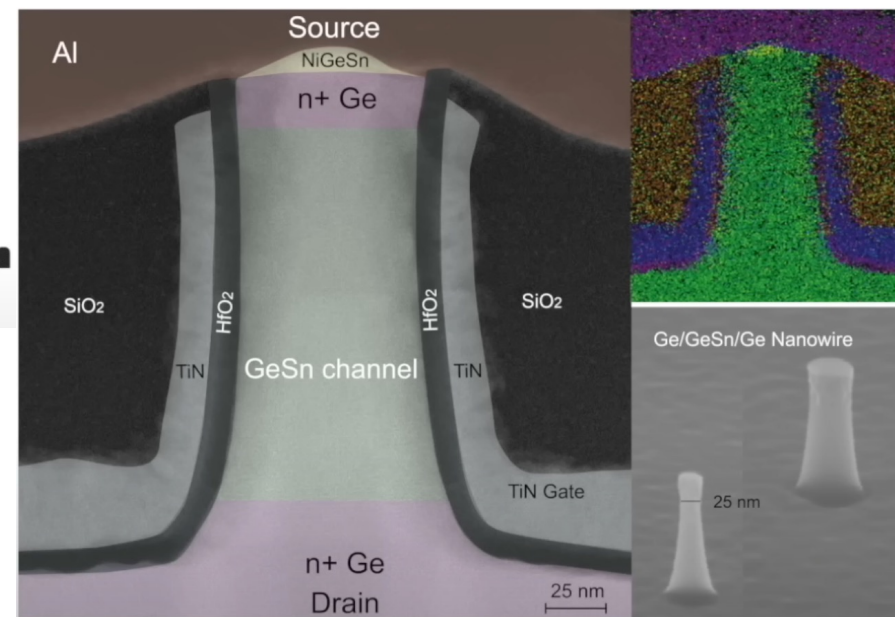


**Gallium nitride transistor**



**Cubic boron arsenide**

- Нитрид-Галия
- Сплавы Германия и Олова
- Арсенид Бора
- Дисульфид Молибдена
- И другие





# НОВЫЕ УСТРОЙСТВА

- 1) Квантовый бит – тот же бит, что и обрабатывает обычный транзистор.

Для его обработки необходима квантовая точка – структура нано-размера.

Квантовые транзисторы существуют, но пока тестируются.

- 2) Фотонные вычисления.

Использует свет для вычислительных действий.

Недостатки: свет не взаимодействует сам с собой

Такие транзисторы пока на стадии исследования

- 3) Спинтроника – вращение спинов электрона

Плюсы: меньше энергозатраты, работает быстрее

Минусы: требуют абсолютный ноль для работы в обычных условиях

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закон Мура долгое время предоставлял индустрии ориентиры для развития и совершенствования.

Однако с каждым годом очевидно, что мы постепенно приближаемся к «традиционным» пределам уменьшения и уплотнения транзисторов, что замедляет описанный законом Мура прогресс.

Ученые продолжают исследовать новые архитектуры, пробовать новые материалы и оптимизировать ПО для совершенствования микрочипов.

Поэтому слухи о смерти Закона Мура преувеличены. Он, возможно, не сохранится в первоначальном виде, но его дух прогресса актуален как никогда.

# ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ

1. Как закон Мура влияет на стоимость производства микрочипов и электронных устройств? Каковы экологические последствия непрерывного роста плотности транзисторов, предсказанного законом Мура?
2. Почему в настоящее время закон Мура не верен в той форме, какой он был представлен изначально?
3. Известно, что закон Мура о количестве транзисторов в обозримом будущем перестанет работать, а что насчет памяти? Может ли настать такой же исход для нее?
4. Какие существуют альтернативные модели и подходы, которые могут вызвать сомнения в применимости или дополнить Закон Мура?
5. Какие изменения произошли в применимости Закона Мура в последние годы?
6. Как вы считаете, может ли закон Мура перестать работать в ближайшие 10-20 лет? То есть столкнёмся ли мы с кризисом развития микроэлектроники, когда мы не сможем удваивать количество транзисторов в силу достижения их минимального размера?



# ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ

7. Какие факторы обусловили возникновение Закона Мура? Какие технологические тенденции и прорывы подтверждают его действительность в настоящее время?
8. Какие стратегии и инновации разрабатываются в индустрии полупроводников, чтобы приспособиться к изменяющимся требованиям и ограничениям Закона Мура? Какие конкретные примеры и тенденции подтверждают или вызывают сомнения в актуальности Закона Мура в современной электронике и информационных технологиях?
9. Какие факторы влияют на применимость Закона Мура в настоящее время? Есть ли конкретные прогнозы по тому, в какой момент времени Закон Мура точно перестанет выполняться?
10. Когда были введены первые корректировки в формулировку закона Мура?
11. Как закон Мура повлиял на область хранения данных и какие успехи были достигнуты в этой области?
12. Как появление технологии систем на кристалле (System-on-a-chip) повлияло на применимость Закона Мура?

# ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ

13. Какие еще теории, модели предлагаются для объяснения развития технологий, и как их можно сравнить с законом Мура? Какие технологические инновации были предприняты, чтобы закон Мура продолжал действовать?

Какие в компьютерных науках существуют другие эмпирические законы, наподобие закона Мура?

14. Применяются ли какие-нибудь стратегии и решения для поддержания конкурентоспособности и соблюдения закона Мура? Какие последствия может иметь пересмотр Закона Мура на практику разработки и производства микроэлектроники?
15. Что такое технология «больше, чем Мура», как она связана с законом Мура, и какие компании сейчас являются лидерами в этой области?

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ