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
- Технологии производства:
 - Фотолитография
 - Материалы и процессы
- Улучшение дизайна и архитектуры чипов
- Экономия энергии

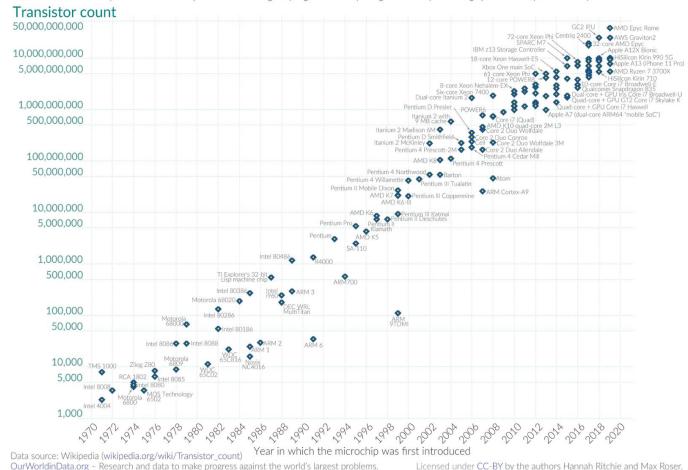
ЗАКОН МУРА

- 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

Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years Our World

in Data

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.



Зависимость числа транзисторов на кристалле

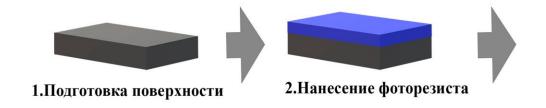
микропроцессора от времени

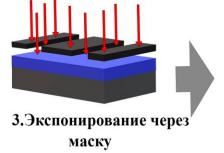
Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

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.

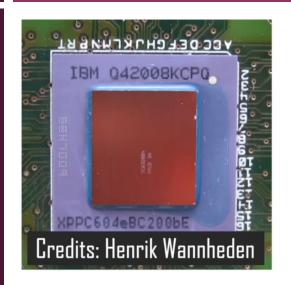
• Экономические проблемы

- 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





Central Processing Unit





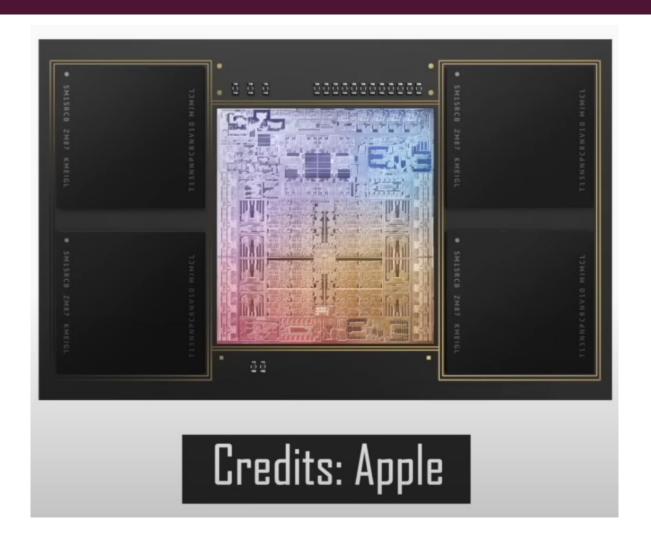
Credits: Rod Castler

GPU

Graphics Processing Unit NPU

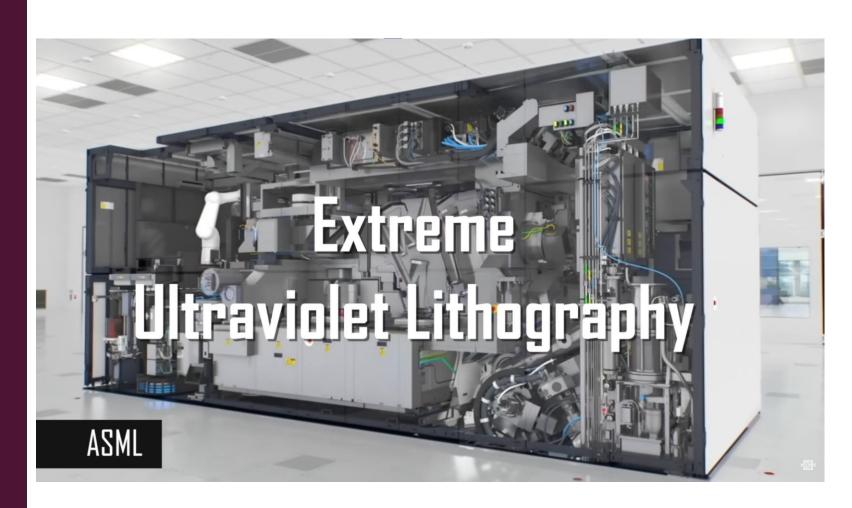
Neural Processing Unit

APPLE MI



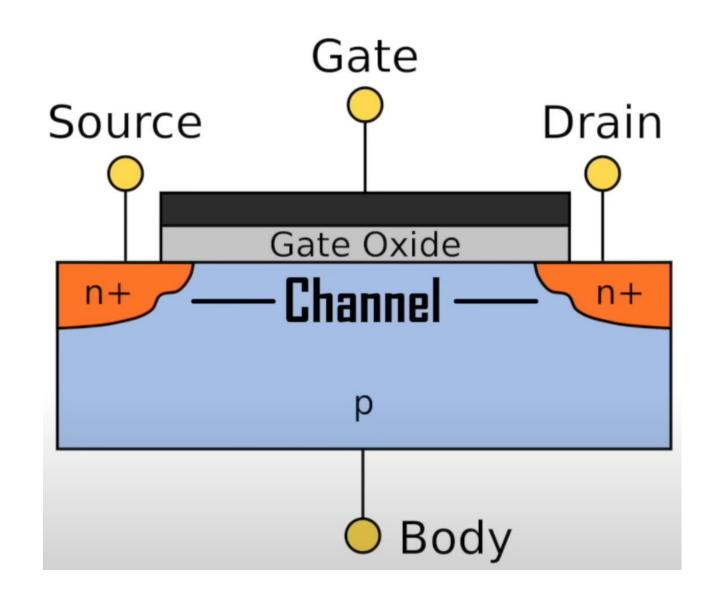
2) УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ

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



3) 3D APXИTEKTУРА

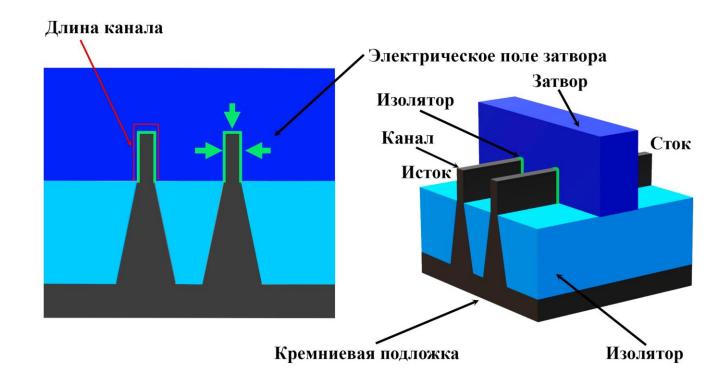
- Транзистор выступает в роли переключателя для электричества
- Раньше транзисторы печатались на плоской поверхности
- Транзисторы типа Fin-FET имеют «объемный» проводящий канал
- Архитектура GAAFET находится в разработке



FIN-FET

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

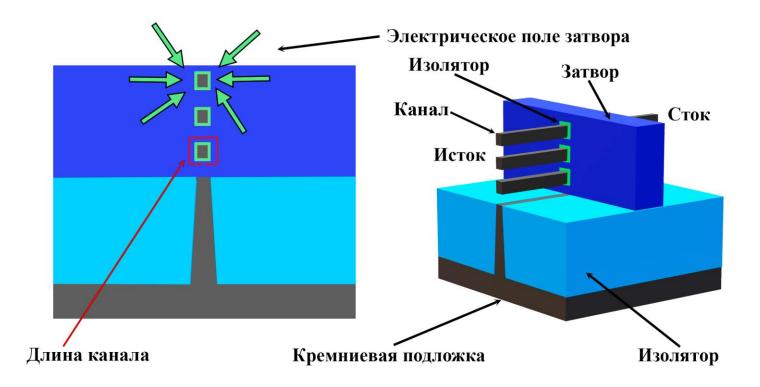
FinFET (упрощенная модель)



GAAFET

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

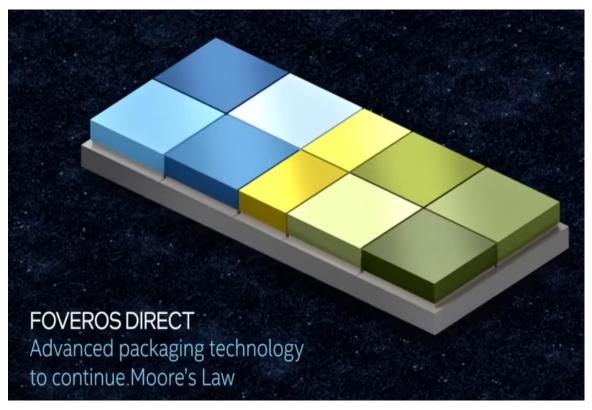
GAAFET (упрощенная модель)



ЧИП INTEL

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

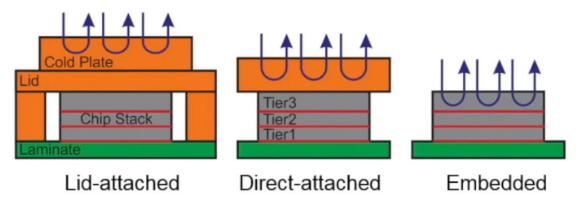




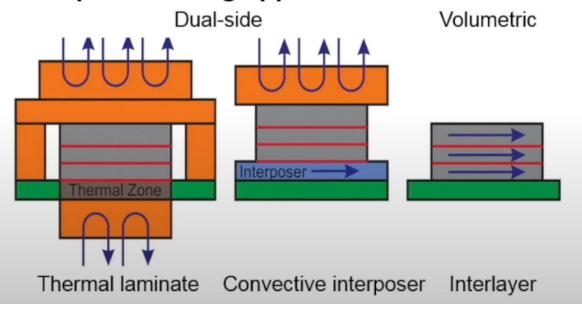
ОХЛАЖДЕНИЕ

- 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 одни на его замену



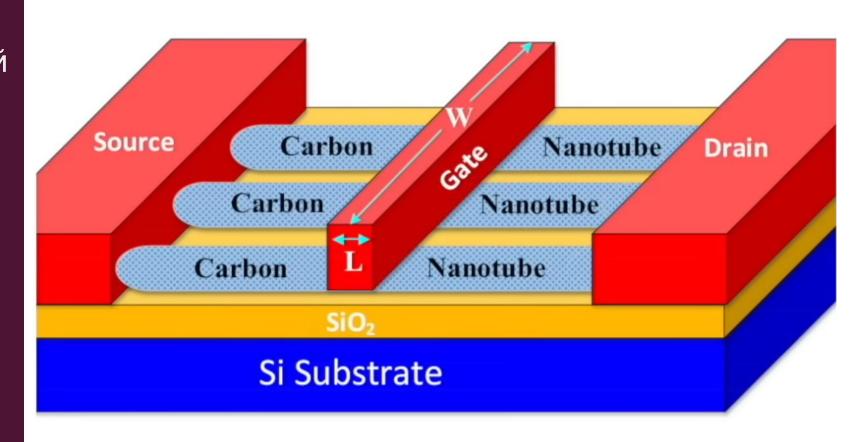
ГРАФЕН

- 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

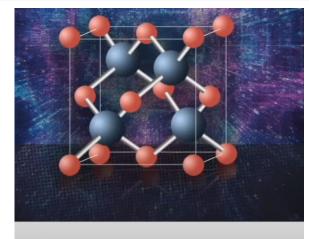


ДРУГИЕ МАТЕРИАЛЫ, КОТОРЫЕ НЕ ПОДОШЛИ ПОД ЗАМЕНУ КРЕМНИЯ

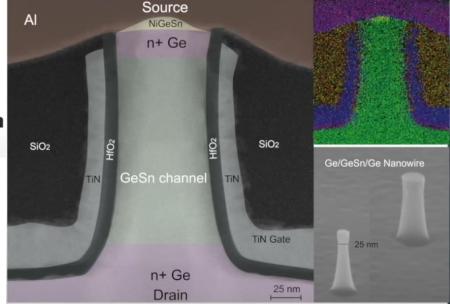
- Нитрид-Галия
- Сплавы Германия и Олова
- Арсенид Бора
- Дисульфид Молибдена
- И другие



Gallium nitride transistor



Cubic boron arsenide



НОВЫЕ УСТРОЙСТВА

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

Для его обработки необходима квантовая точка – структура наноразмера.

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