

A photograph of a semiconductor manufacturing facility. In the center, a worker wearing a full-body white cleanroom suit and a cap is walking down a long, brightly lit aisle. The aisle is flanked by rows of large, industrial-grade machinery, likely lithography or etching tools. The floor is made of light-colored wooden planks. In the background, there are more machines and an 'EXIT' sign with an arrow pointing left. The overall atmosphere is clean and industrial.

Полупроводниковые нанотехнологии: современное состояние, проблемы и перспективы

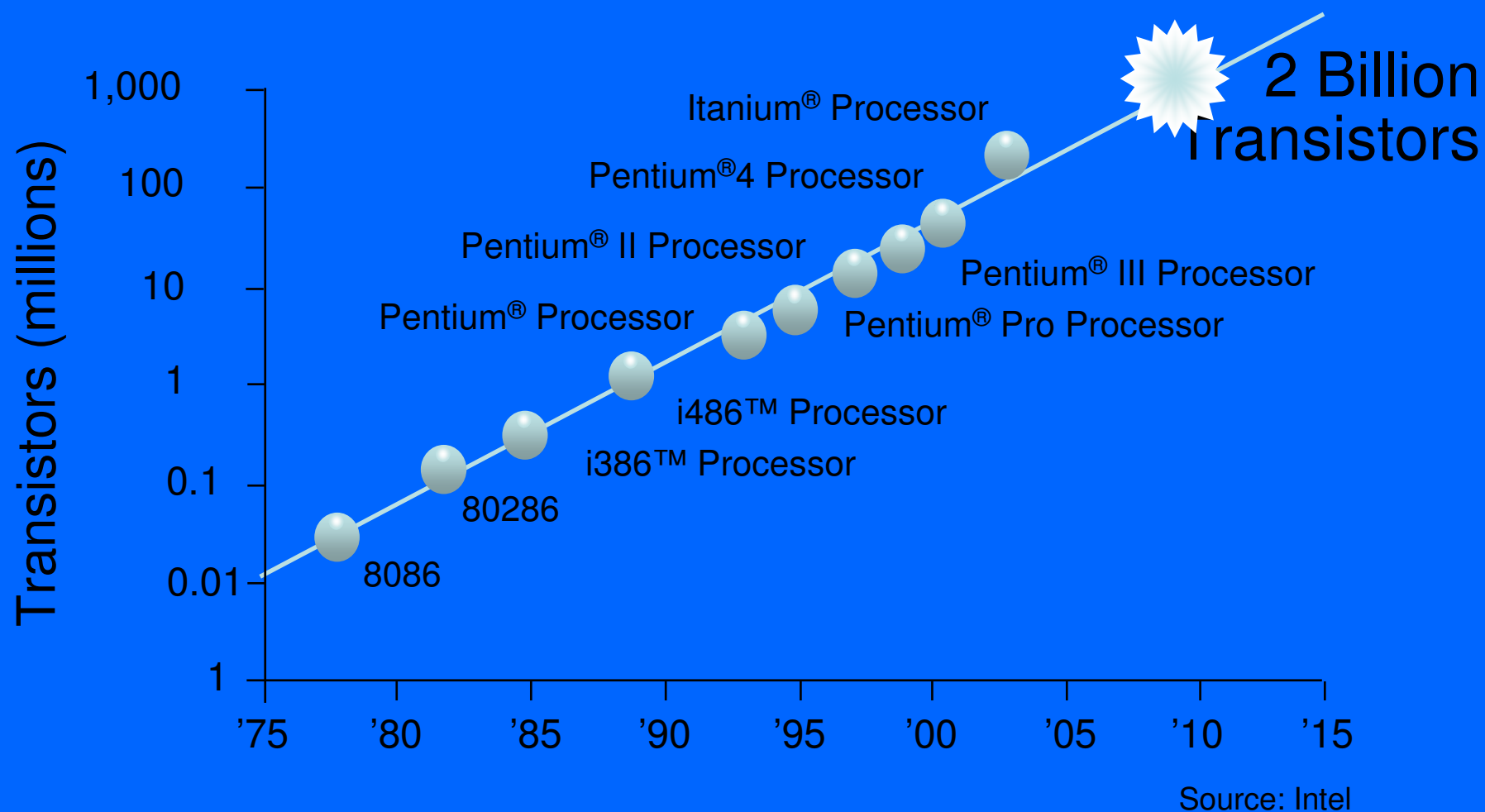
Николай Суетин

Intel

20 апреля, 2010

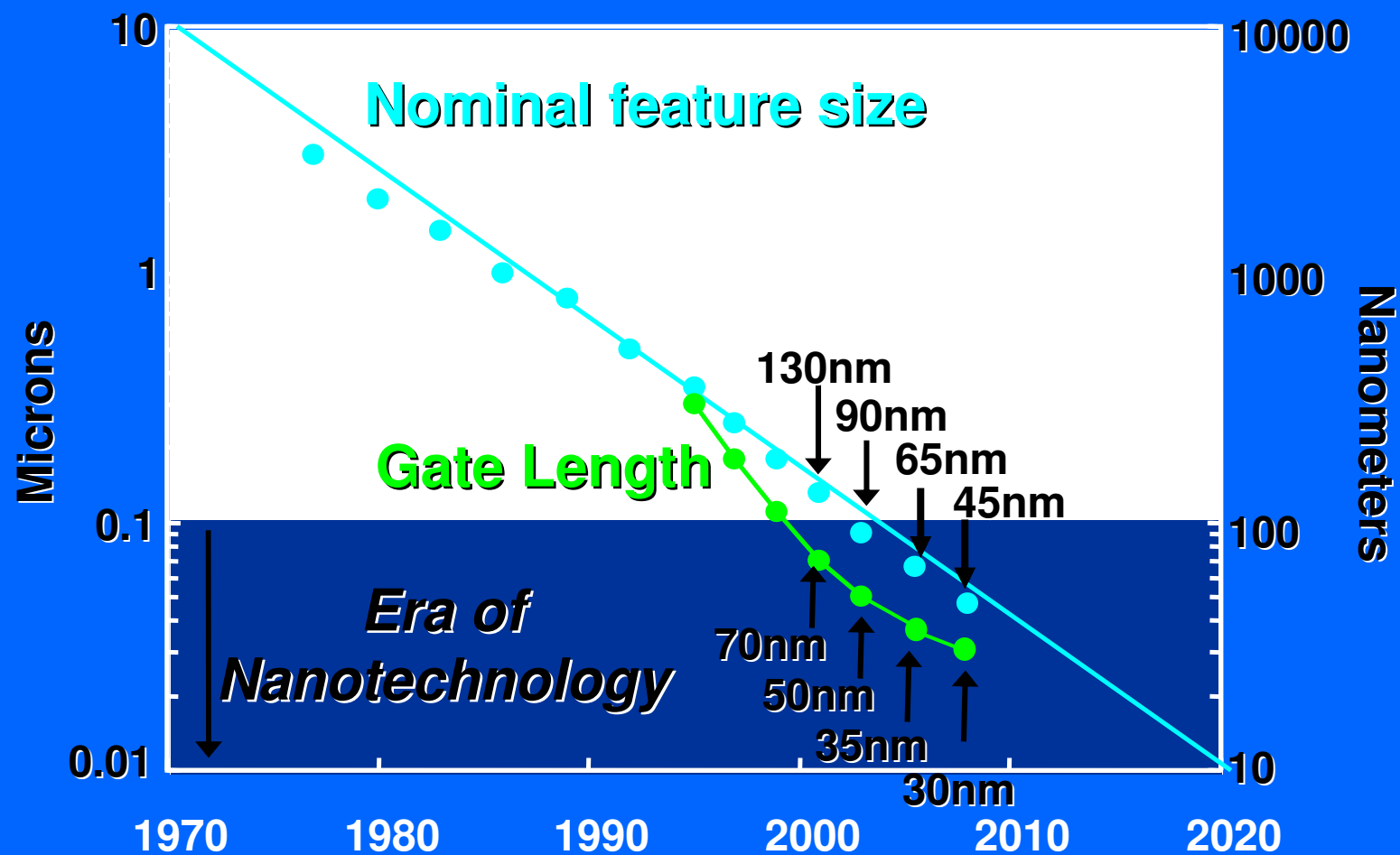
Содержание:

- Текущее состояние полупроводниковых нанотехнологий.
- Проблемы
 - литография
 - новые полупроводники
 - межсоединения
- Альтернативы и потребности в новых подходах
- Заключение



- Количество транзисторов на единице поверхности удваивается каждые 18 месяцев (закон Мура)

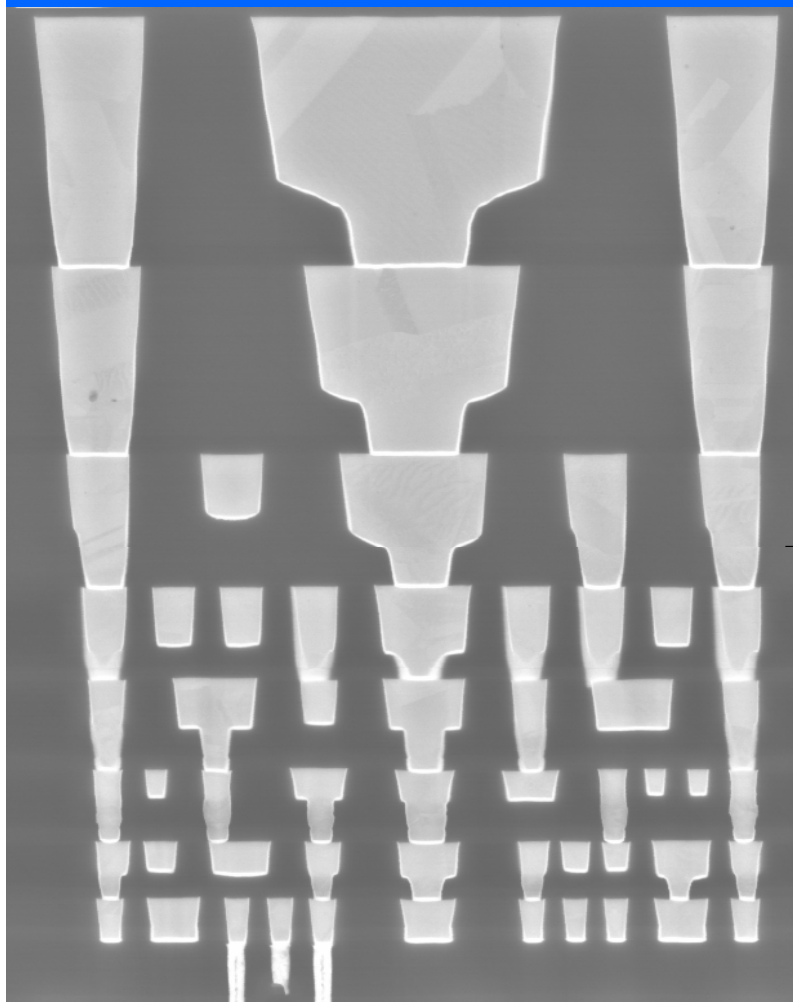
Динамика уменьшения топологических размеров



Структура «камня»



Структура соединений в чипе



M8

M7

M6

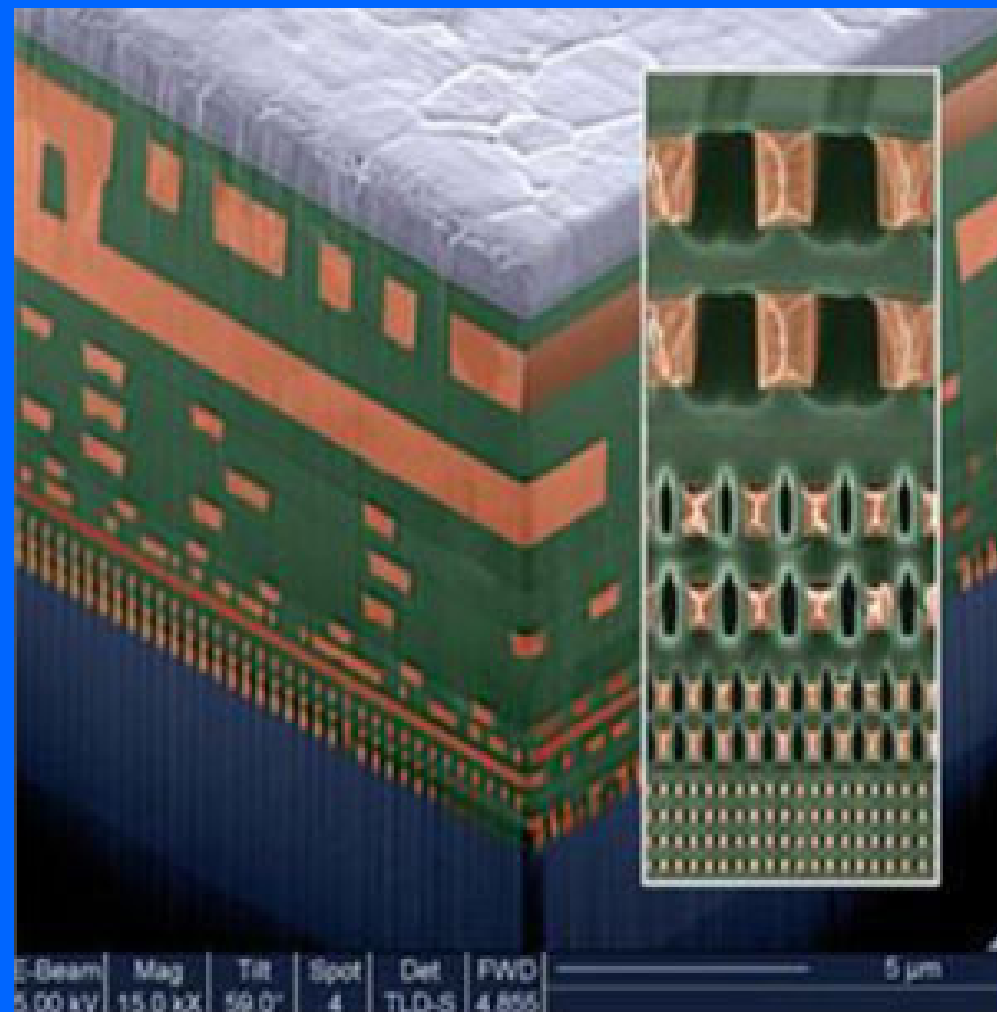
M5

M4

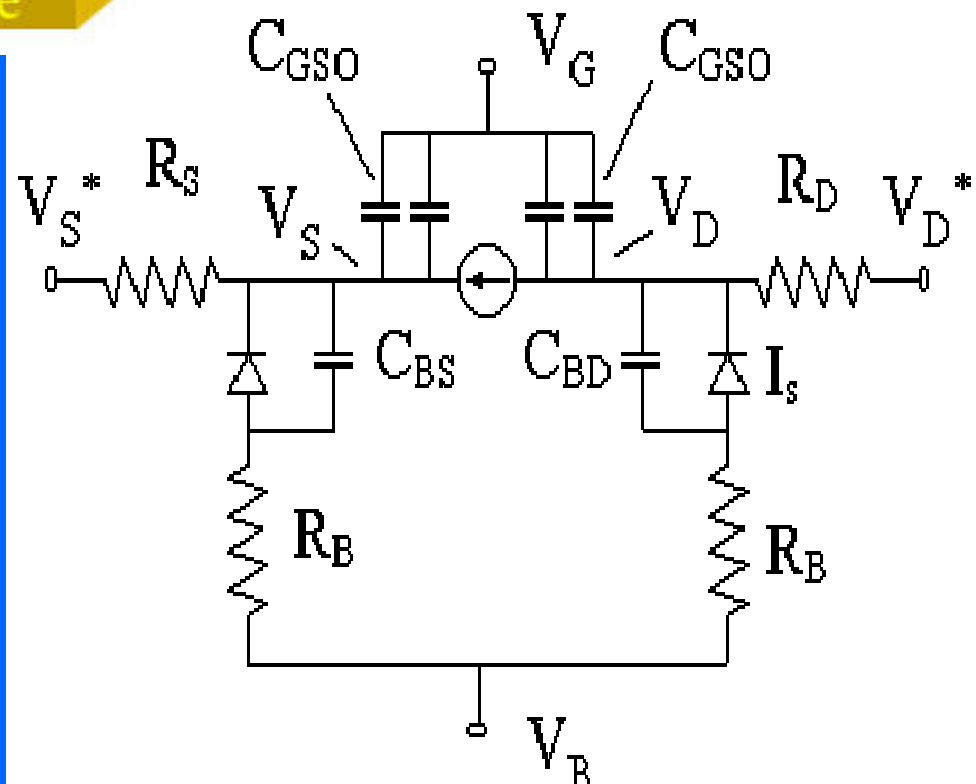
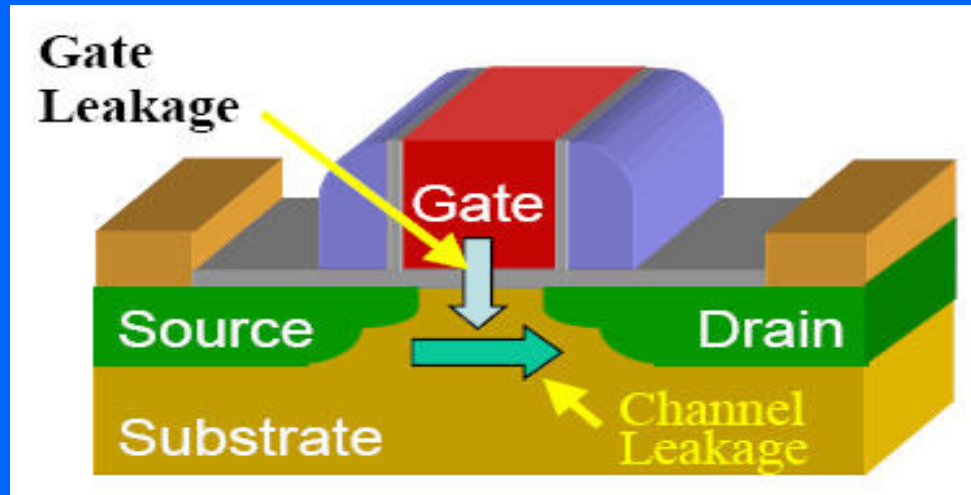
M3

M2

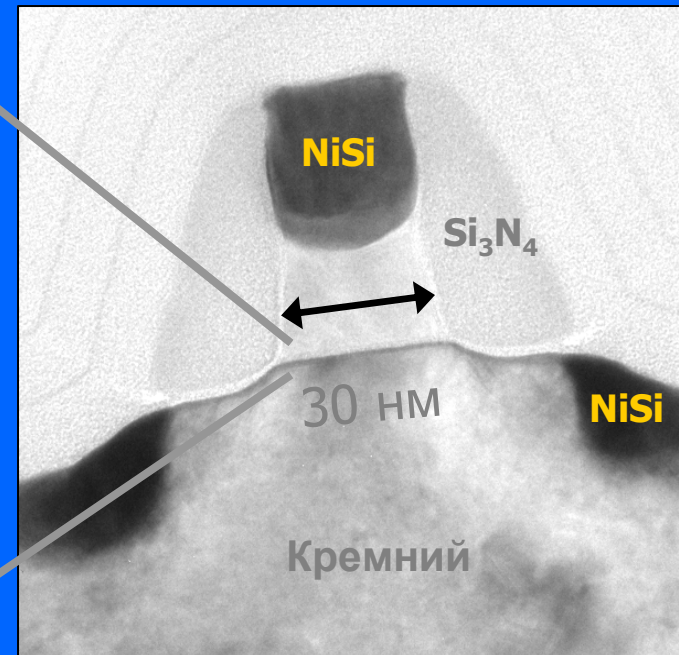
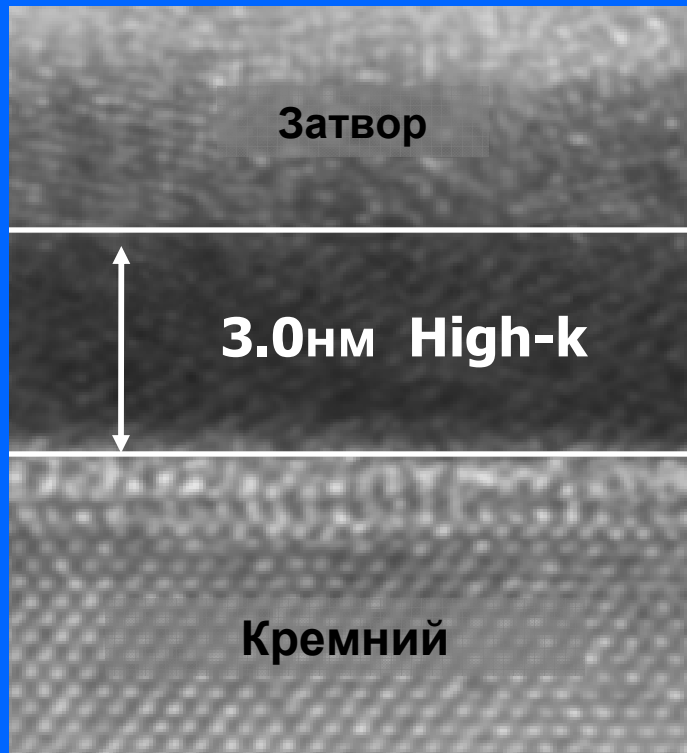
M1



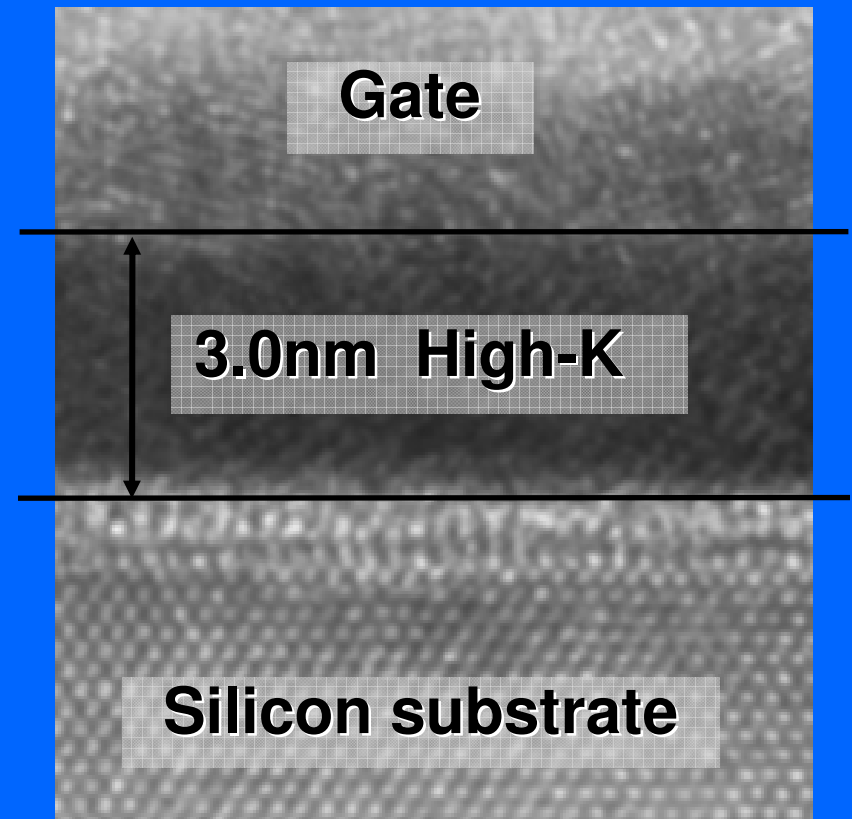
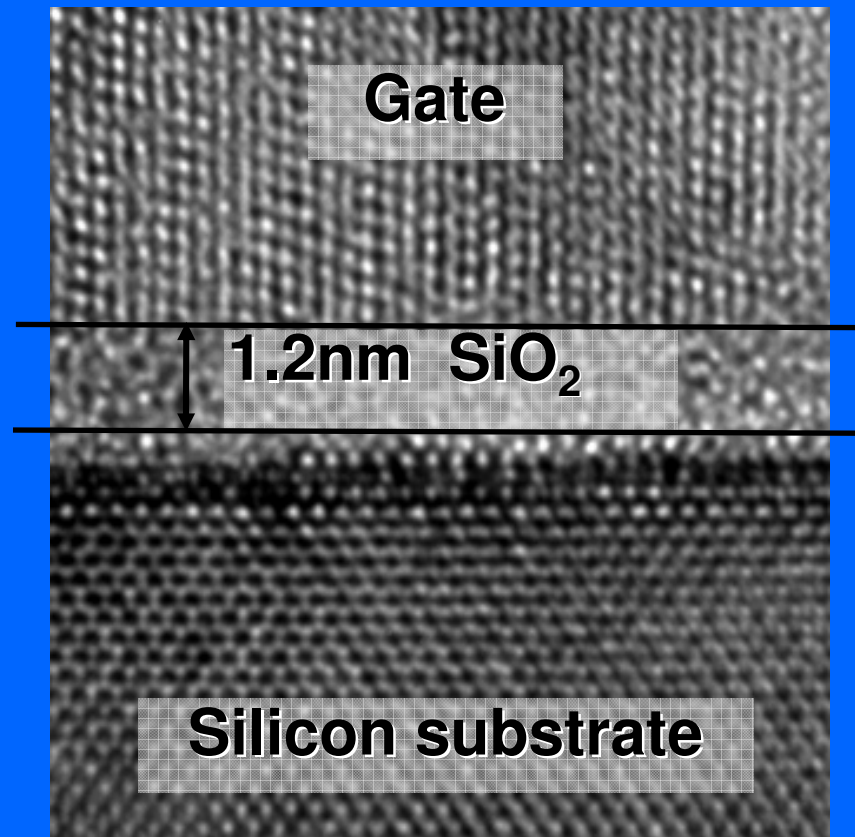
MOSFET эквивалентная электрическая схема



Транзисторы 45 нм



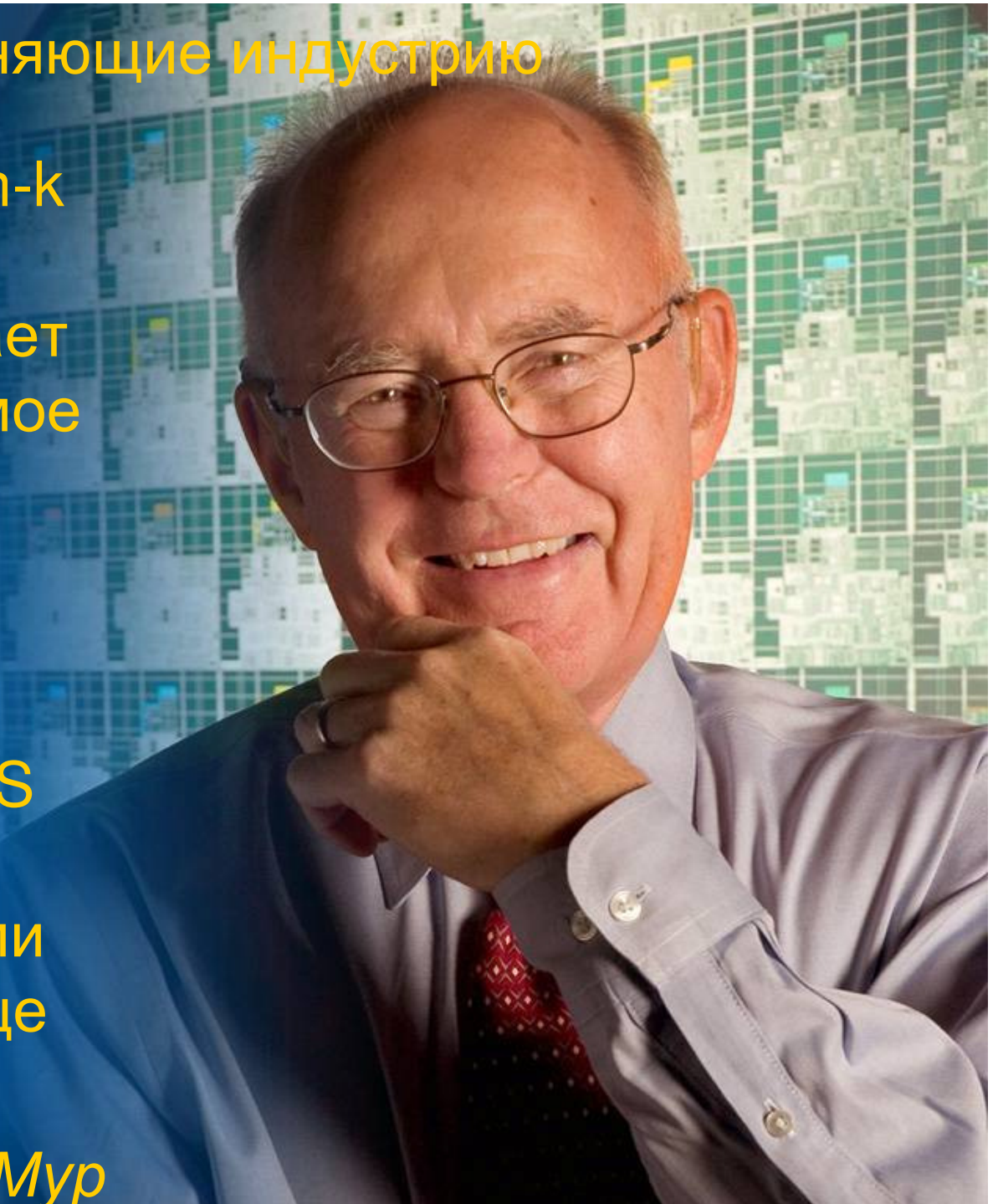
Нанотехнологии для подзатворного диэлектрика



Инновации, изменяющие индустрию

“Реализация high-k и использование металлов означает наиболее значимое изменение в технологии транзисторов со времени изобретения MOS транзисторов с поликремниевыми затворами в конце 1960-х.”

– *Гордон Мур*



32 нм фабрики



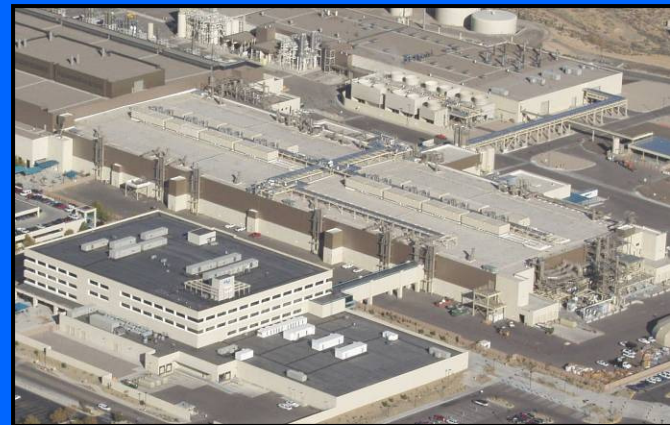
D1D Oregon - Now



D1C Oregon - now

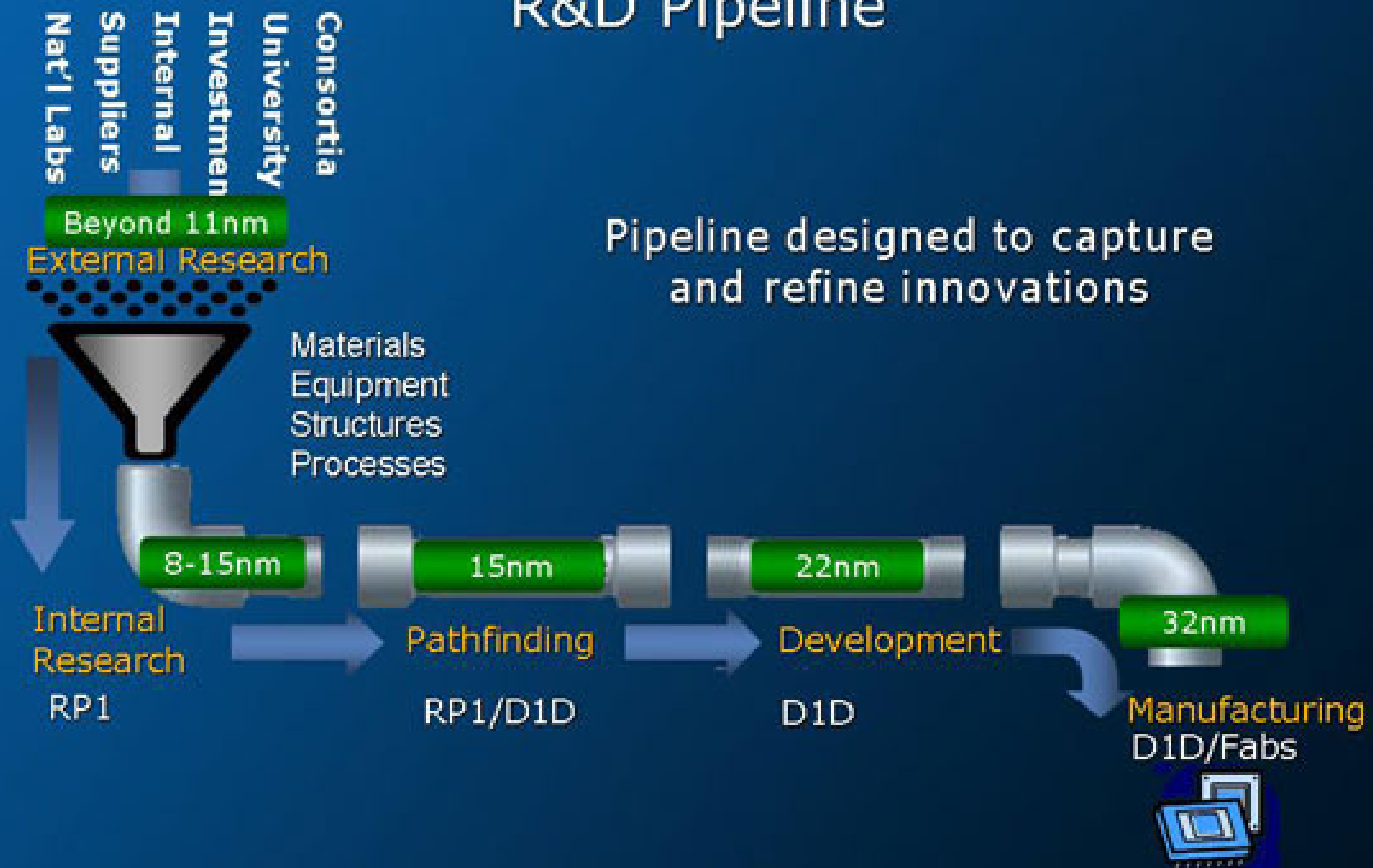


Fab 32 Arizona - 2010

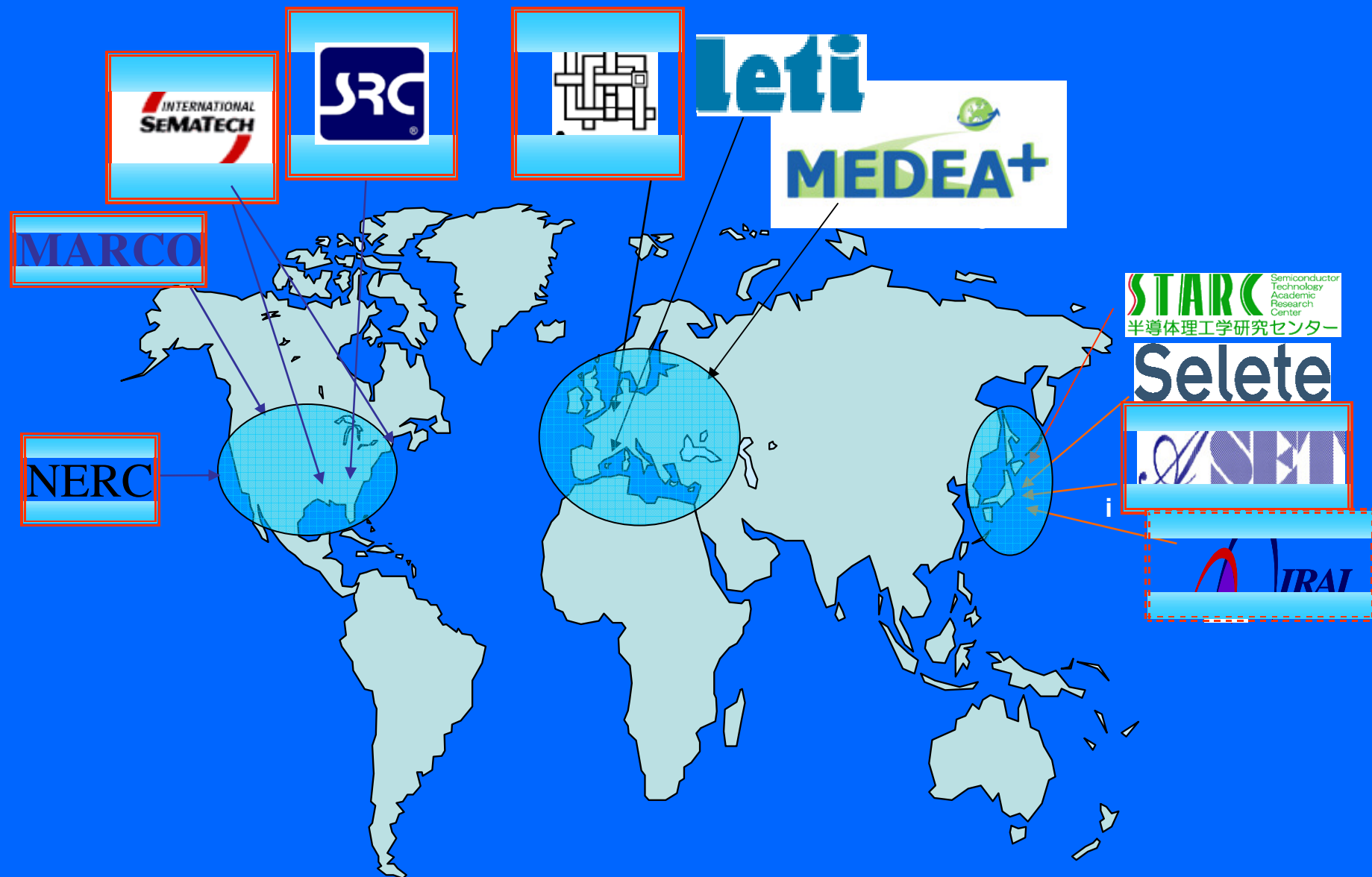


Fab 11X New Mexico - 2010

Unwavering Commitment to Invest in R&D Pipeline



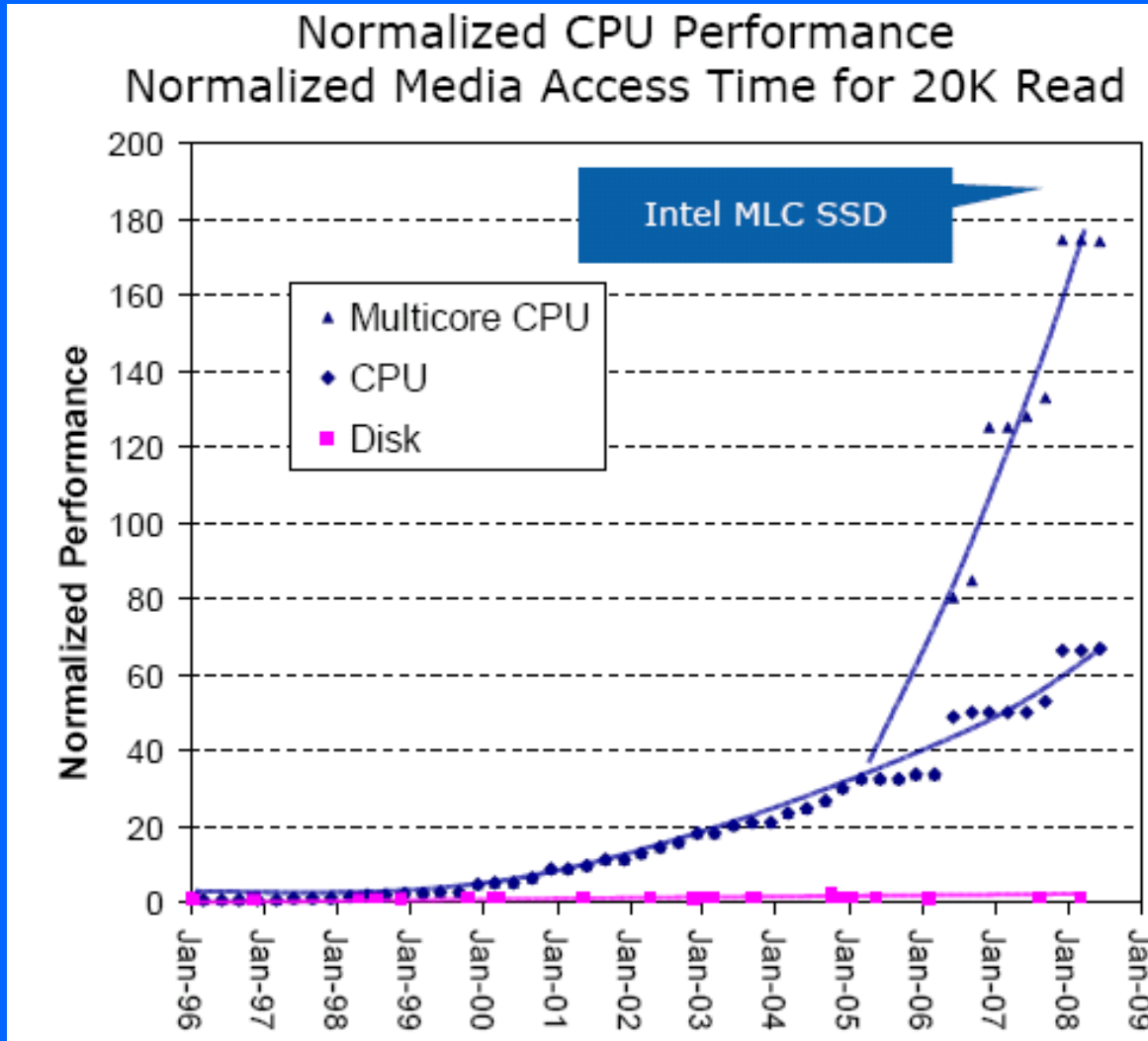
Intel – кооперация в исследованиях



Новая инициатива: 450 мм кремний

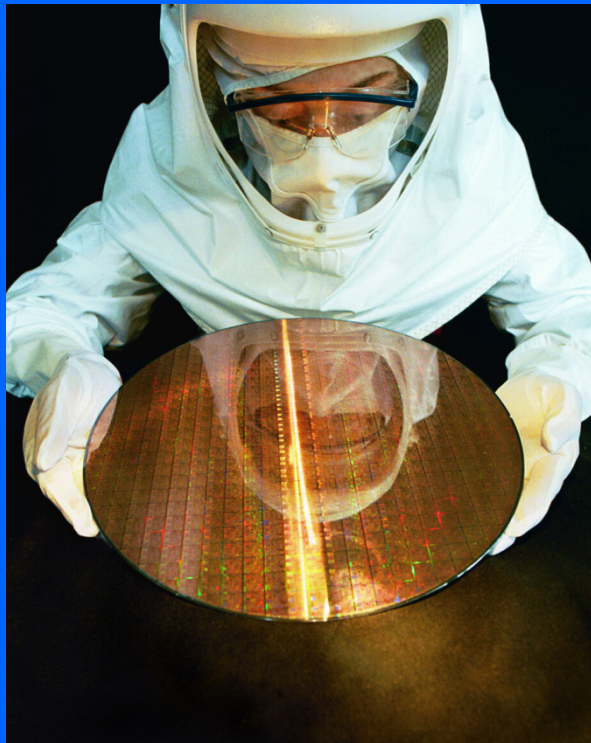


SSD



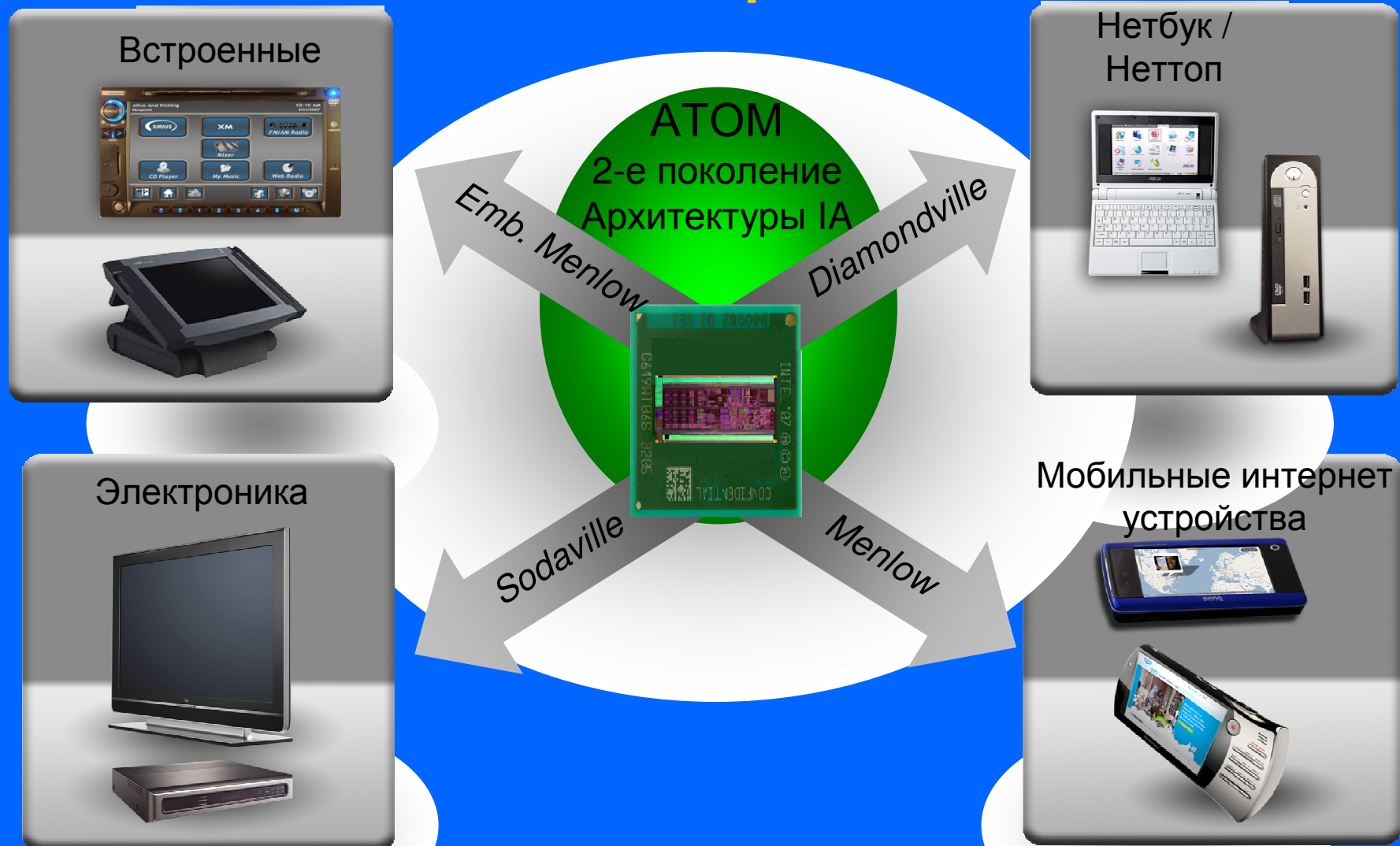
- Скорость доступа к магнитной памяти 1.3X за 13 лет
- 175X CPU!!!

Ключевой вопрос

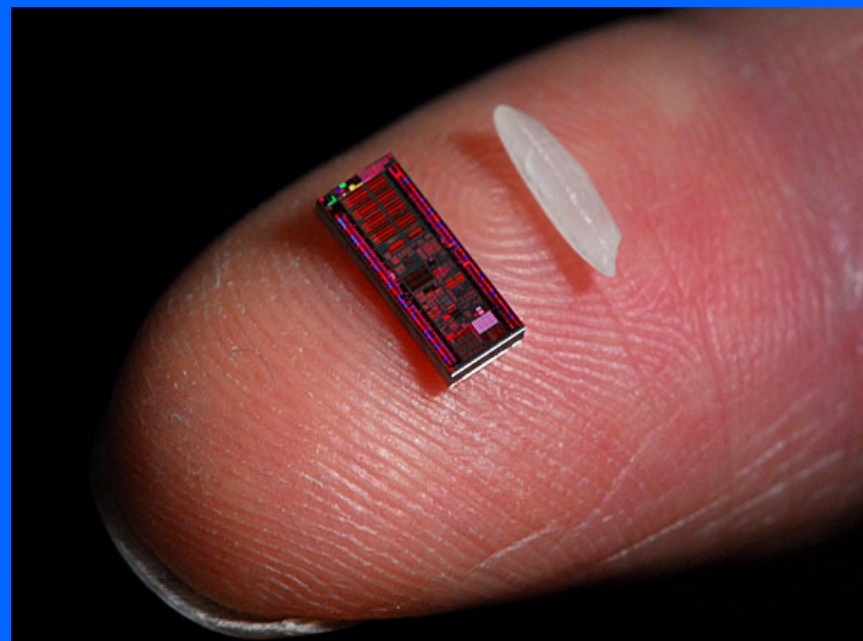
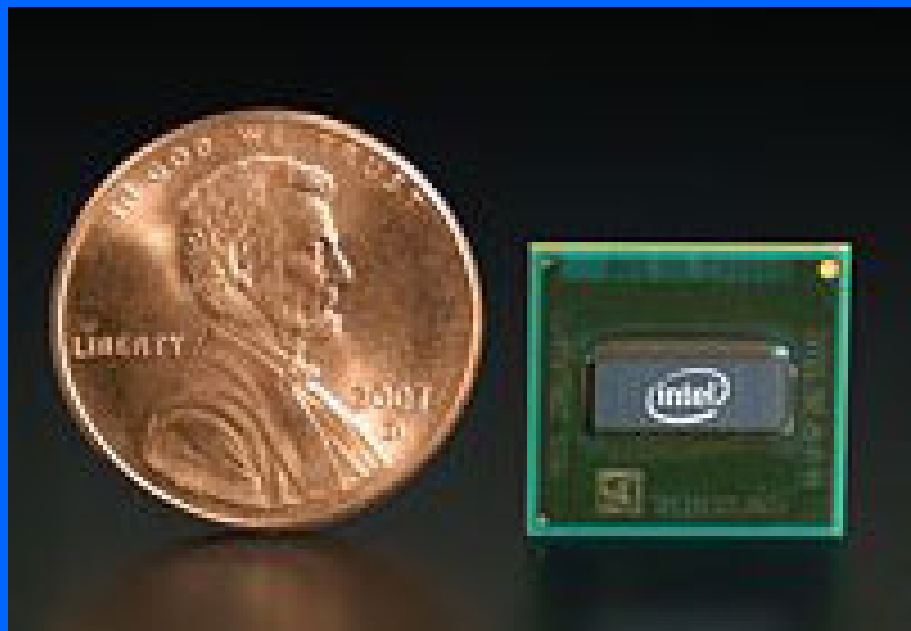


- 1 000 000 000 (миллиард) транзисторов на столе: как использовать всю эту мощь?

Новые направления



Atom processor



Производится по 45 нм технологии. Каждое ядро состоит из 47 миллионов транзисторов.

Новый двухядерный Intel® Atom™ работает на 1.6GHz, имеет память 1MB второго уровня, потребляет не более 8W TDP.

Embedded Devices



Основные тенденции полупроводниковой индустрии

- Закон Мура продолжает действовать
- Рост стоимости разработки новых технологий и материалов, а также затраты на содержание фабрик растут.
- Производительность также растет. Ожидается скачек при переходе на 450 мм пластины

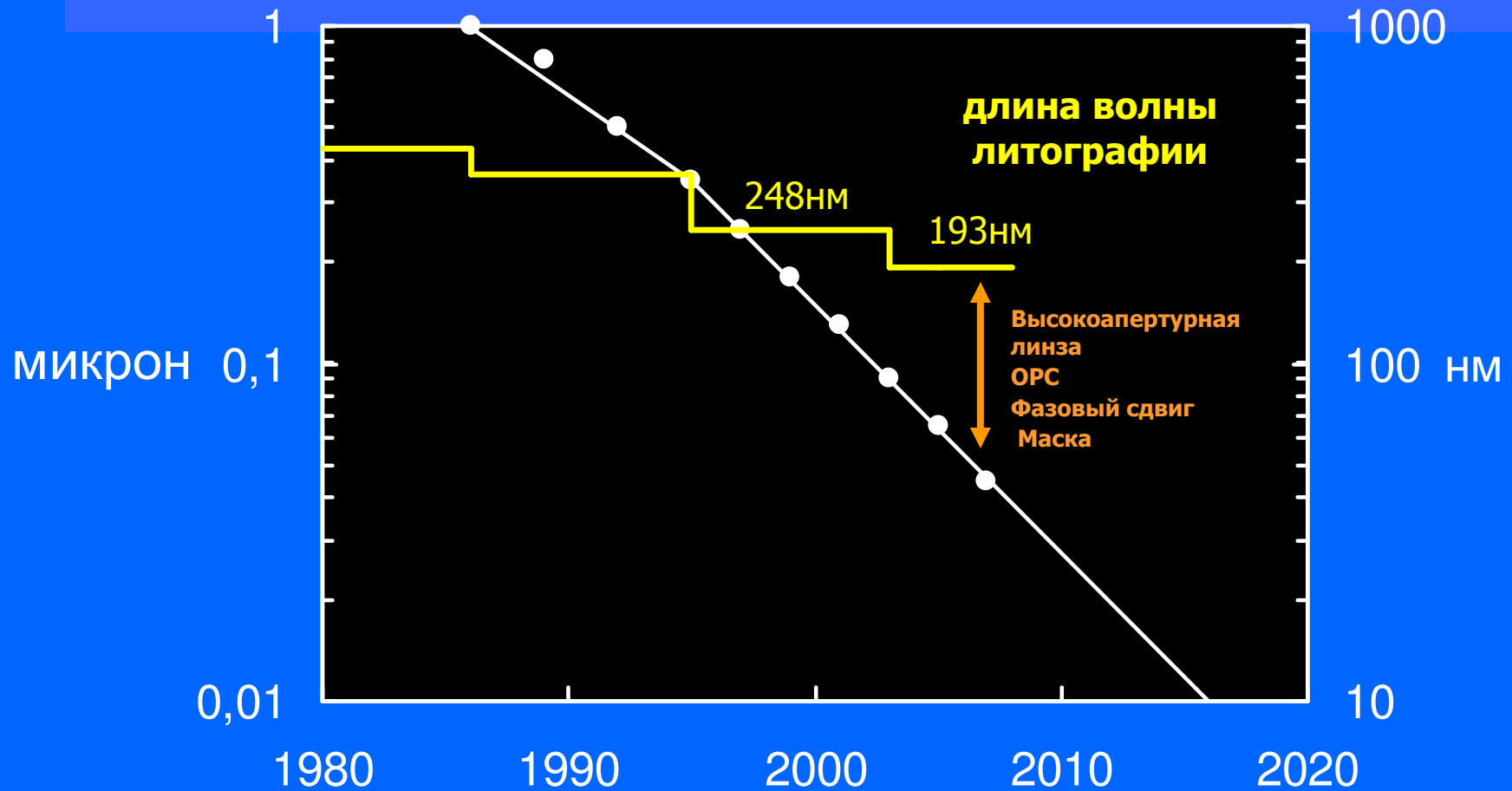
Как результат:

- *Разделение компаний на “fabless” и “foundry”*
- *Outsource основных R&D*
- *Дифференциация за счет развития software*

Технологии будущего

Проблемы литографии

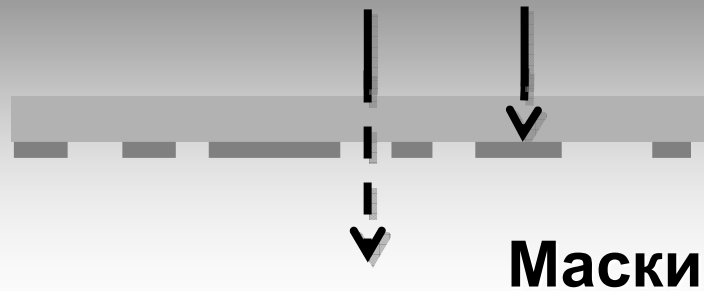
Литография



Новые разработки позволили сохранить 193 нм литография для технологии 32 нм

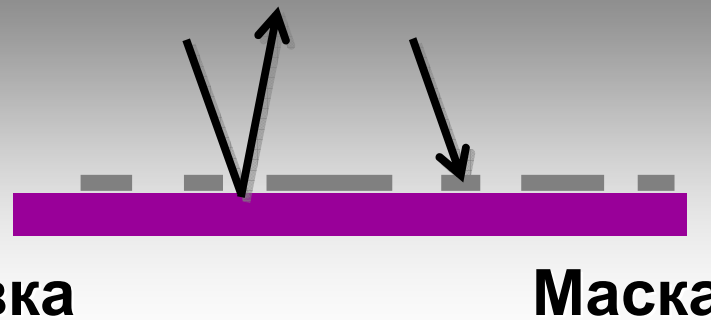
Оптика отражения идет на смену оптике преломления

Преломляющая оптика



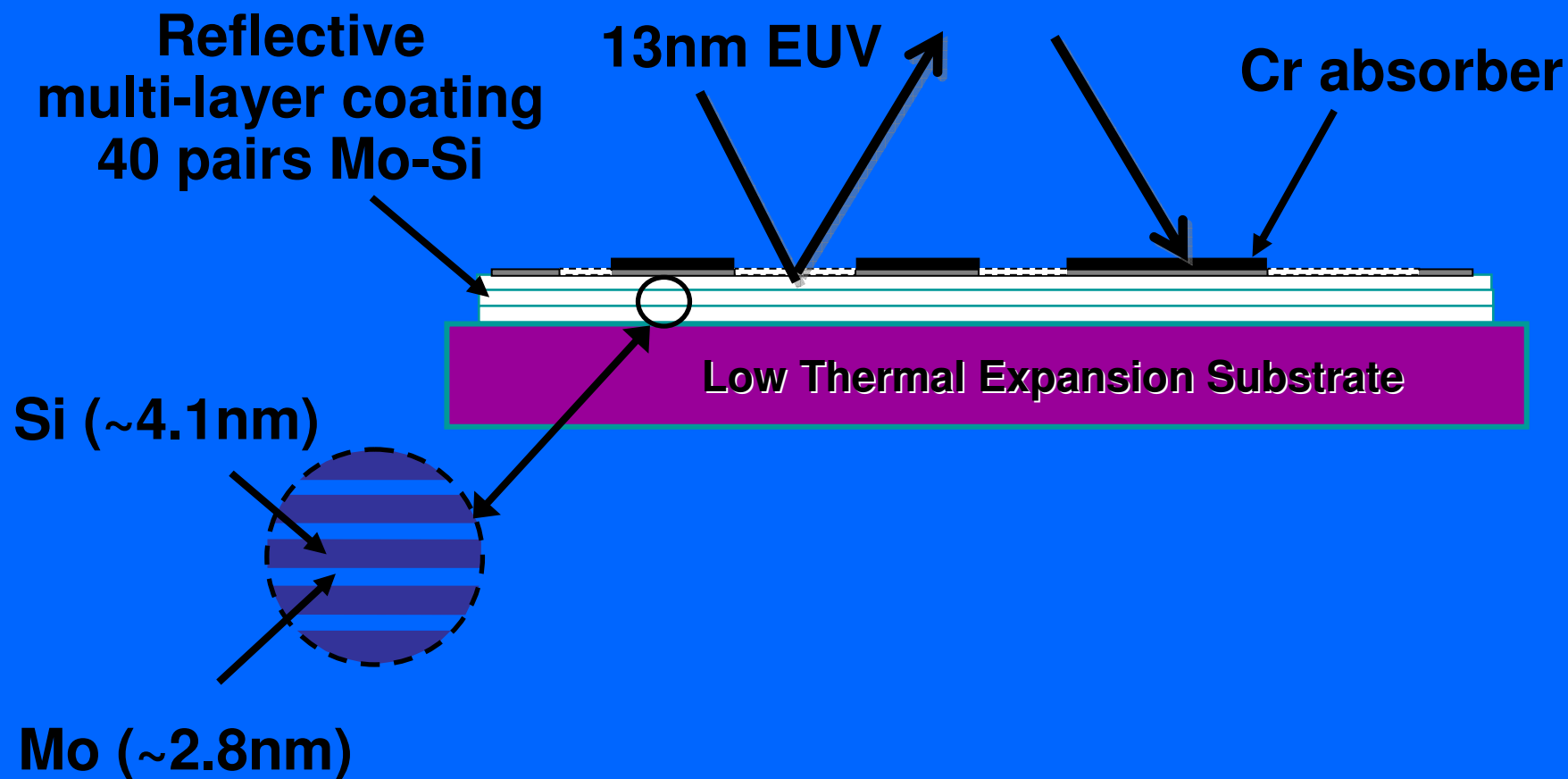
Оптические материалы не прозрачны для 13.5 нм

Отражающая оптика

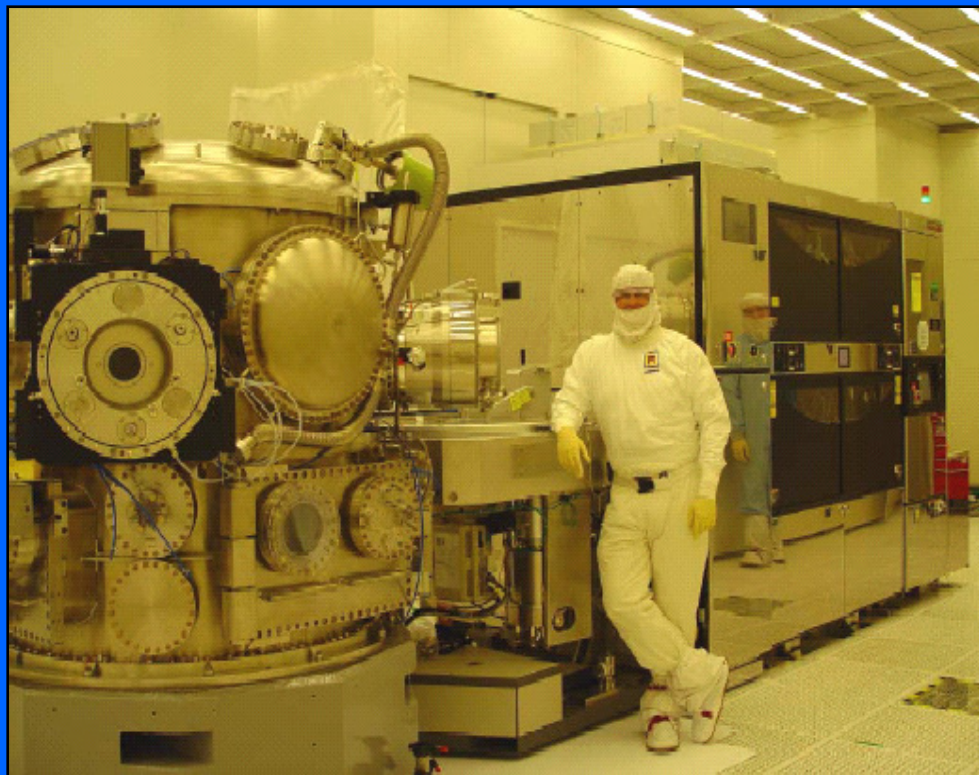


Многослойная Отражающая оптика

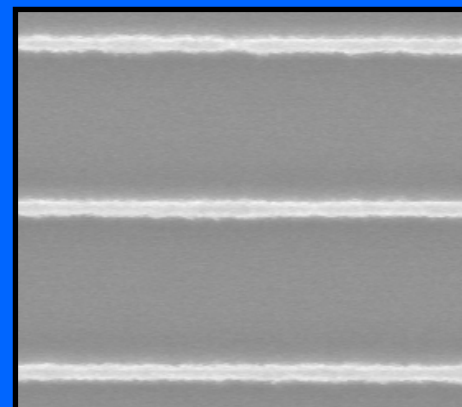
EUV отражающая маска



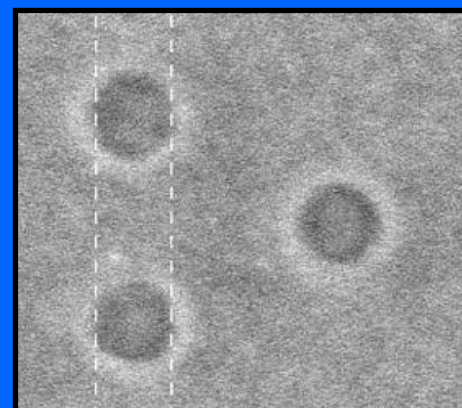
Литография дальним ультрафиолетом



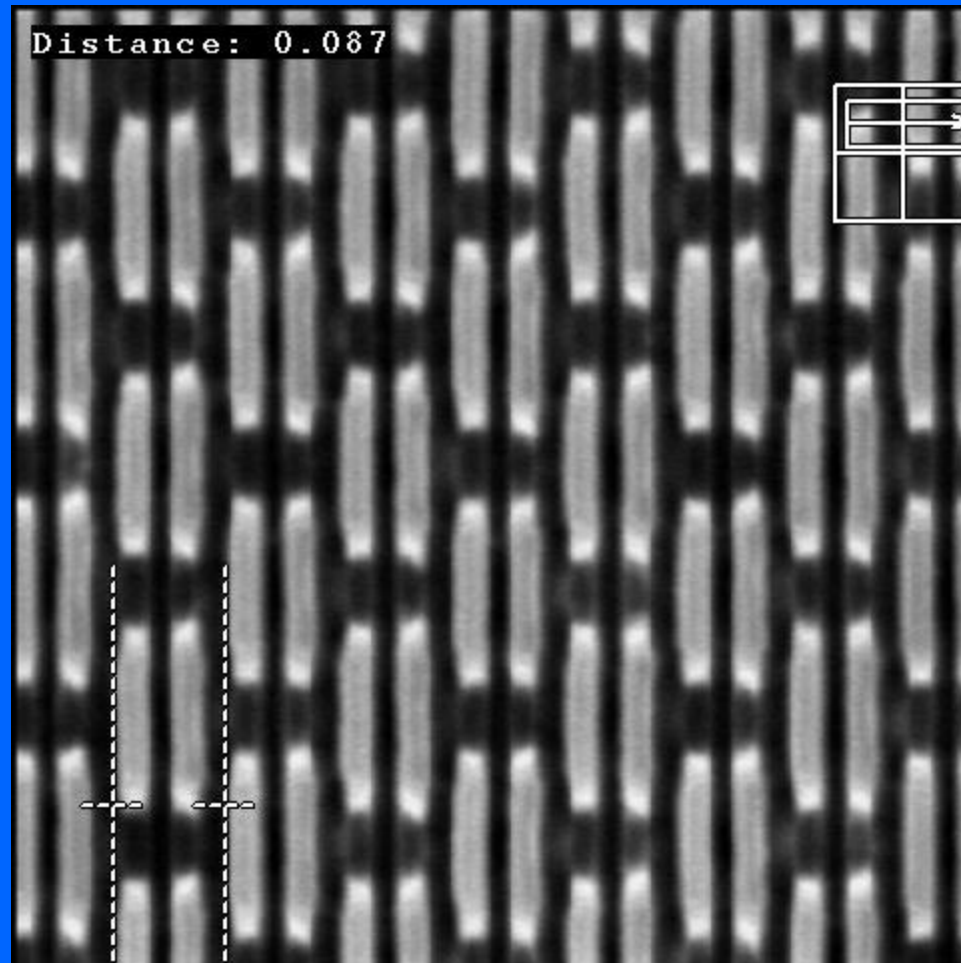
Действующая исследовательская установка EUV в Орегоне



Дорожки 27 нм

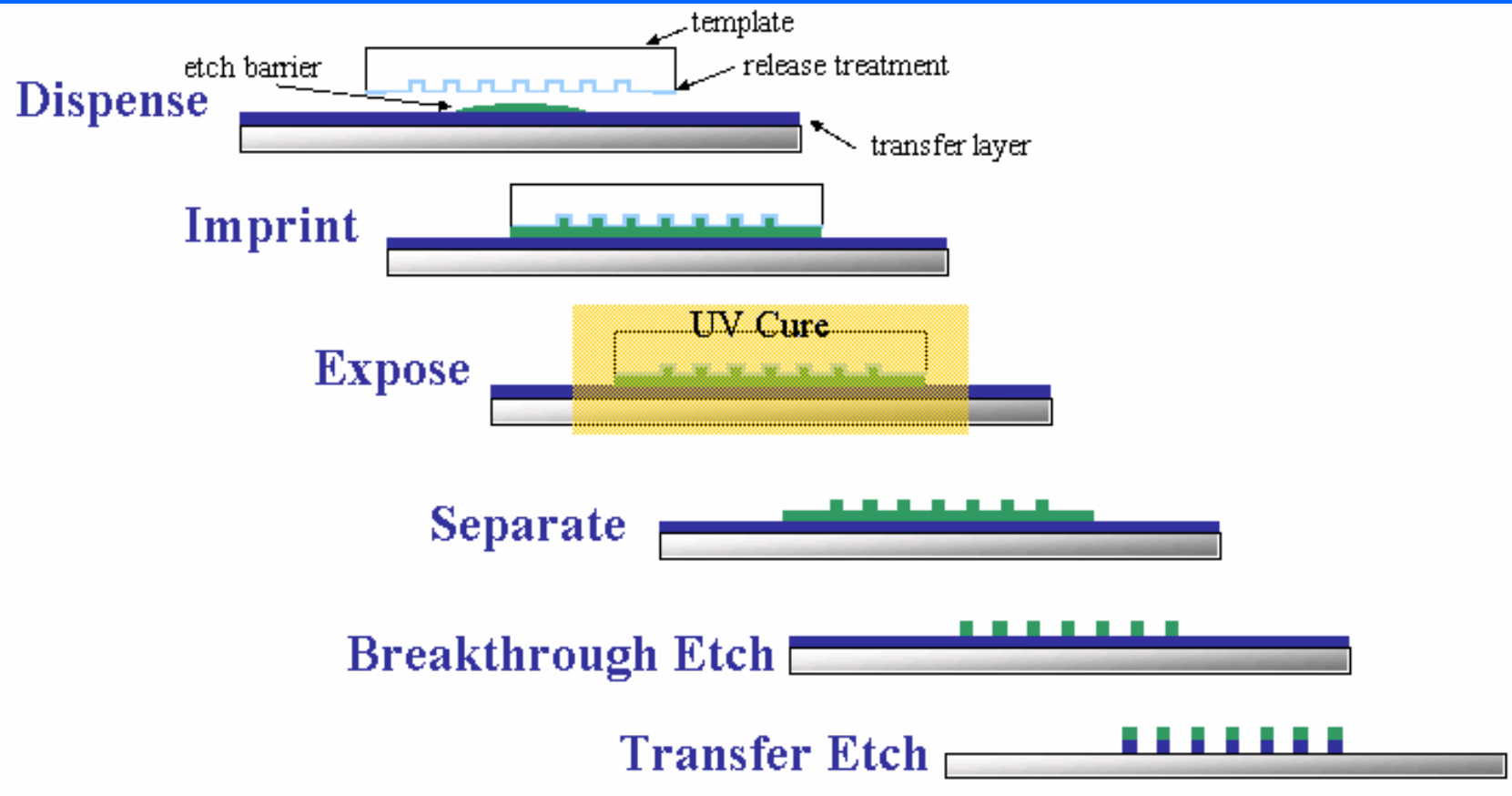


Контакты 41 нм



SEM of 11nm node SRAM structure (22nm half-pitch) demonstrates scalability of SADP technology. (Source: Applied Materials)

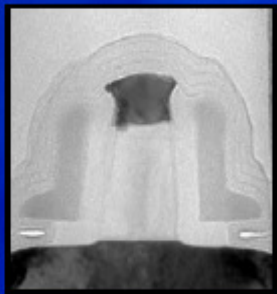
Imprint lithography



Проблемы уменьшения размеров транзисторов

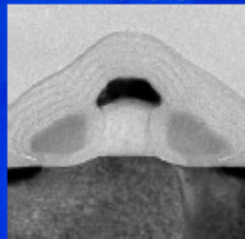
Кремний работает до 10 нм!!

90nm Node
2003



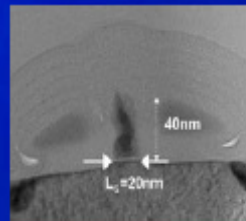
50nm Length
(IEDM2002)

65nm Node
2005



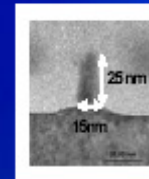
30nm Prototype
(IEDM2000)

45nm Node
2007



20nm Prototype
(VLSI2001)

32nm Node
2009



15nm Prototype
(IEDM2001)

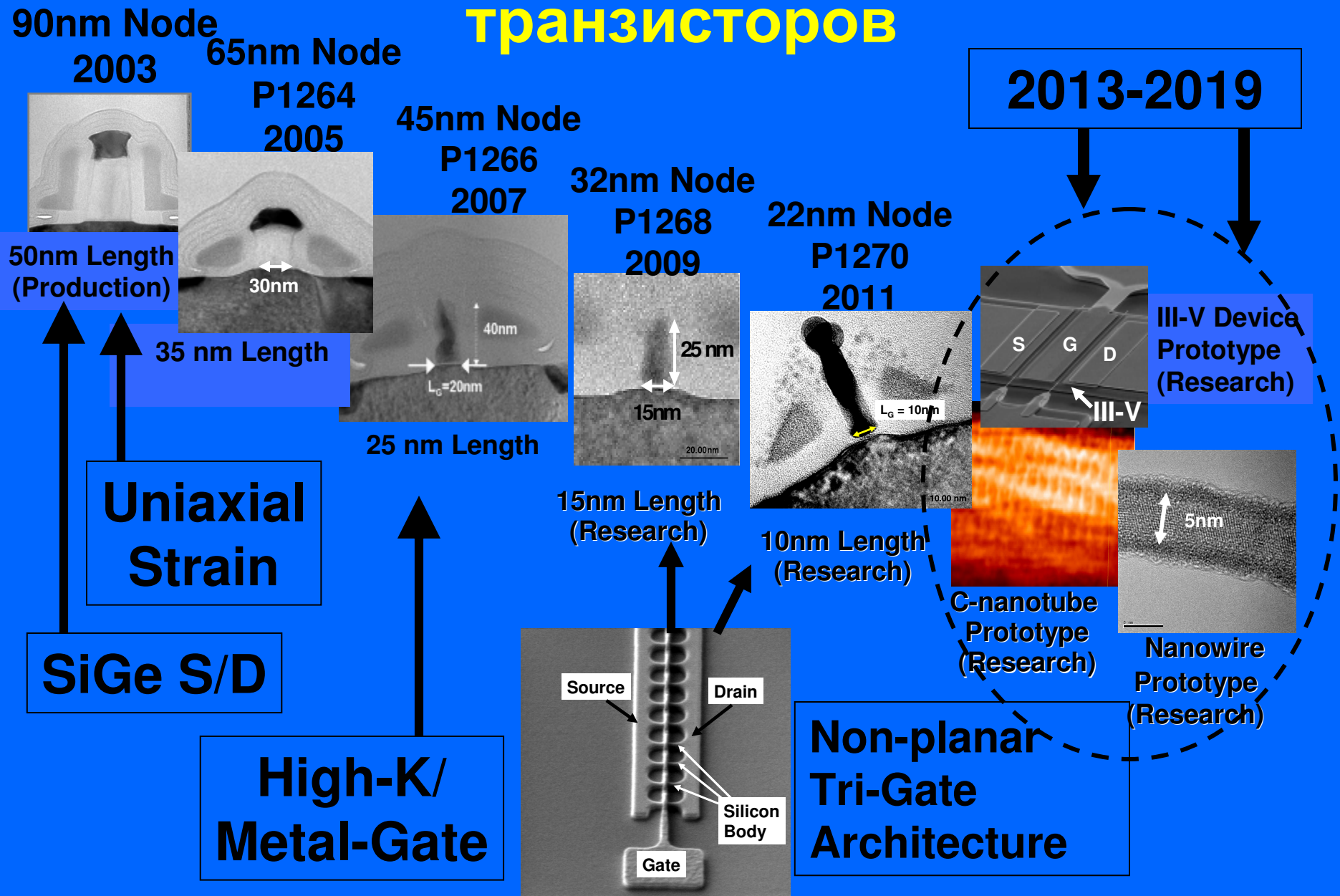
22nm Node
2011



10nm Prototype
(ITJ 2002)

Increasing leakage

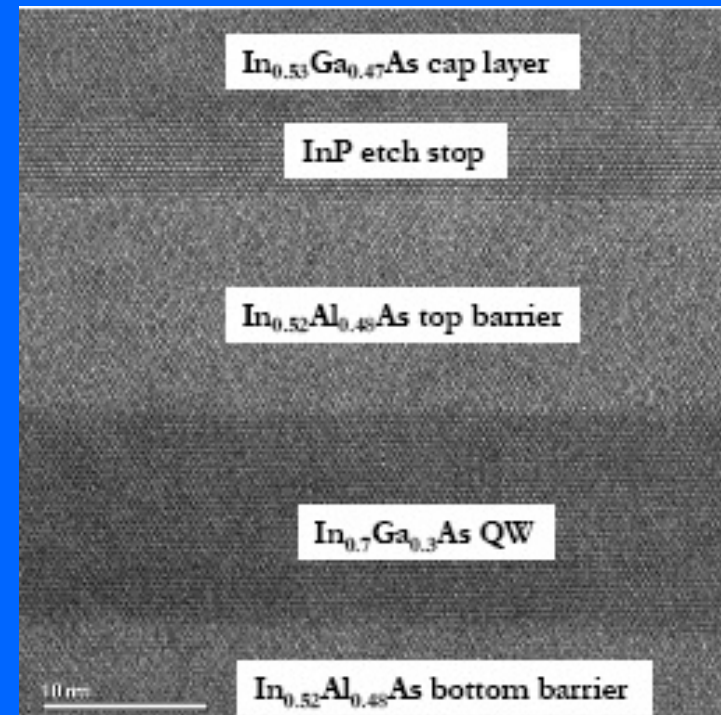
Пути развития полевых транзисторов



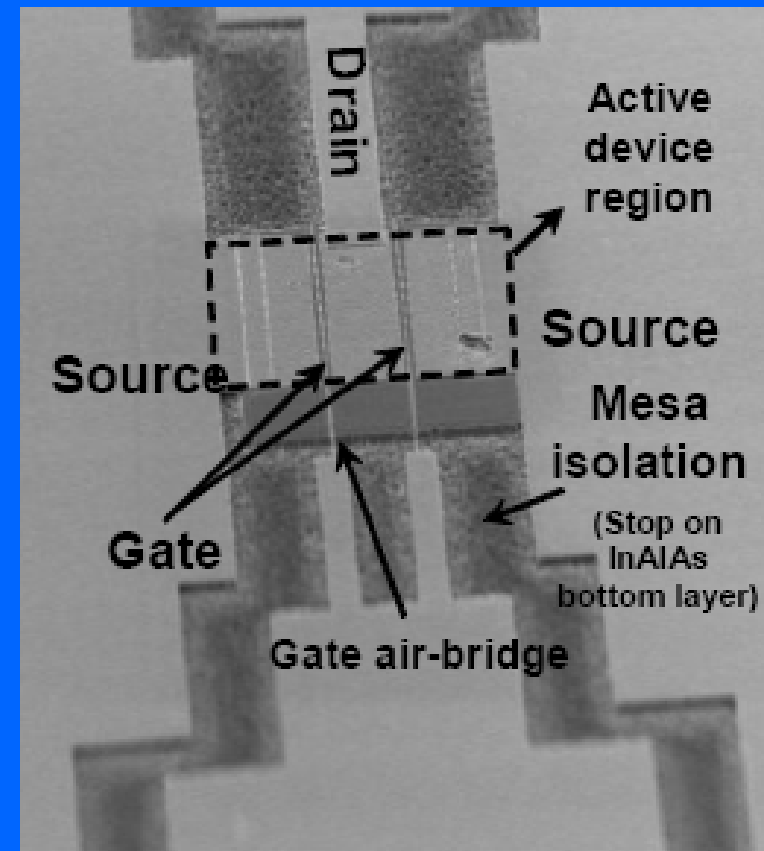
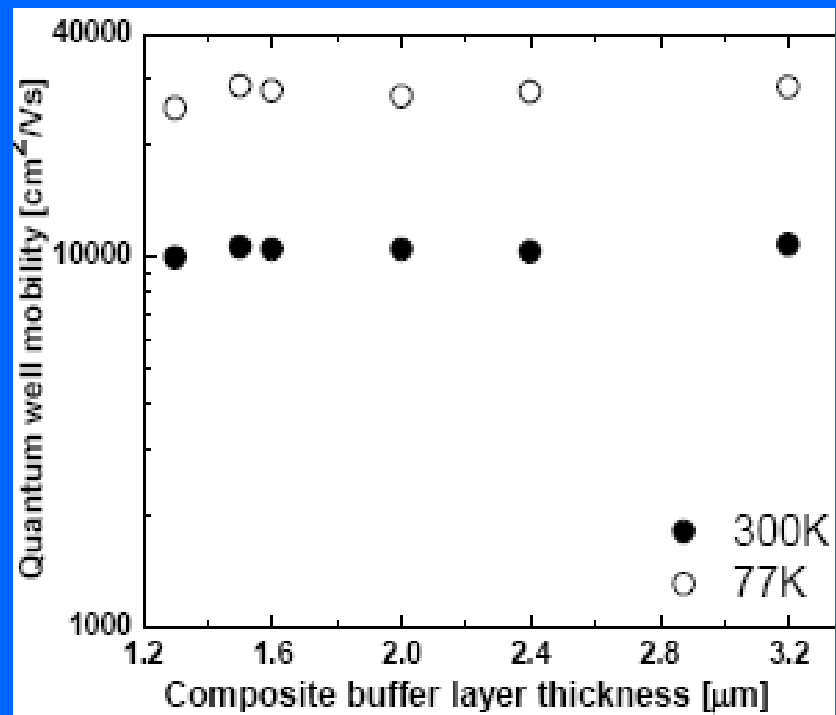
$\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ QWFET на кремнии

$\text{n}^{++}\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ contact	: 20 nm
InP etch stop	: 6 nm
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ top barrier	: 8 nm
Si delta-doped layer	
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ spacer layer	: 5 nm
$\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ channel	: 13 nm
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ bottom barrier	: 100 nm
$\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ graded buffer ($x=0\text{-}0.52$): 0.7-1.1 μm	
GaAs nucleation and buffer layer: 0.5-2.0 μm	
4°(100) Offcut p-type Si substrate	

Metamorphic buffer

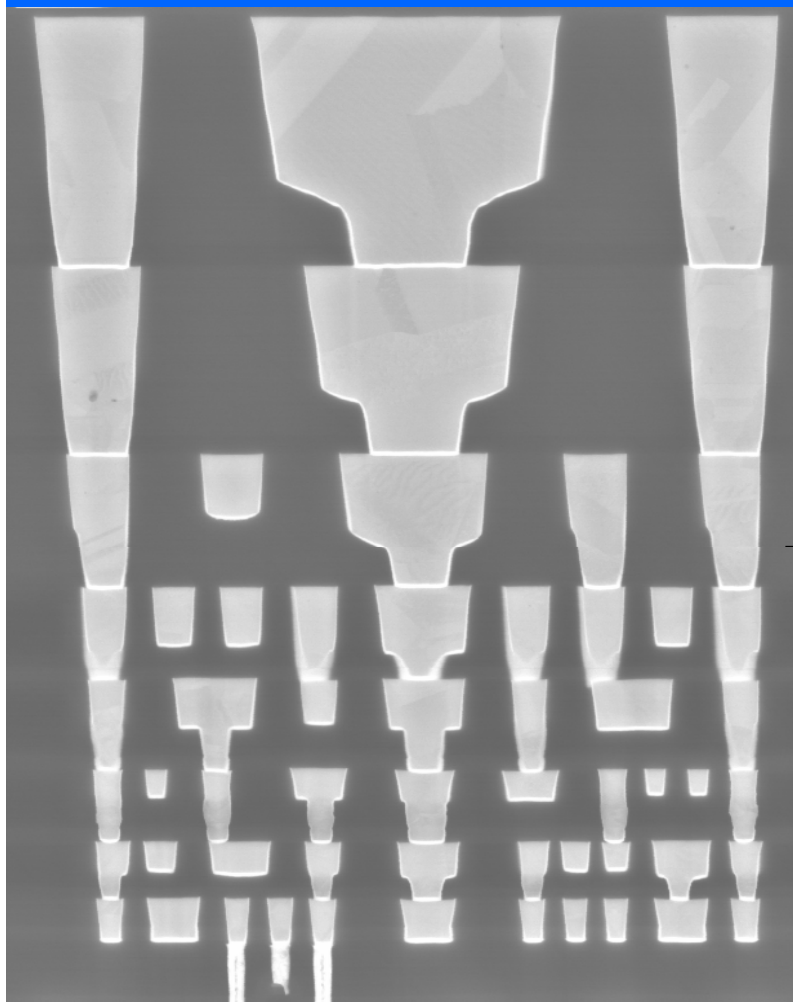


$\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ QWFET на кремнии



Металлизация и Low-k диэлектрики

Структура соединений в чипе



M8

M7

M6

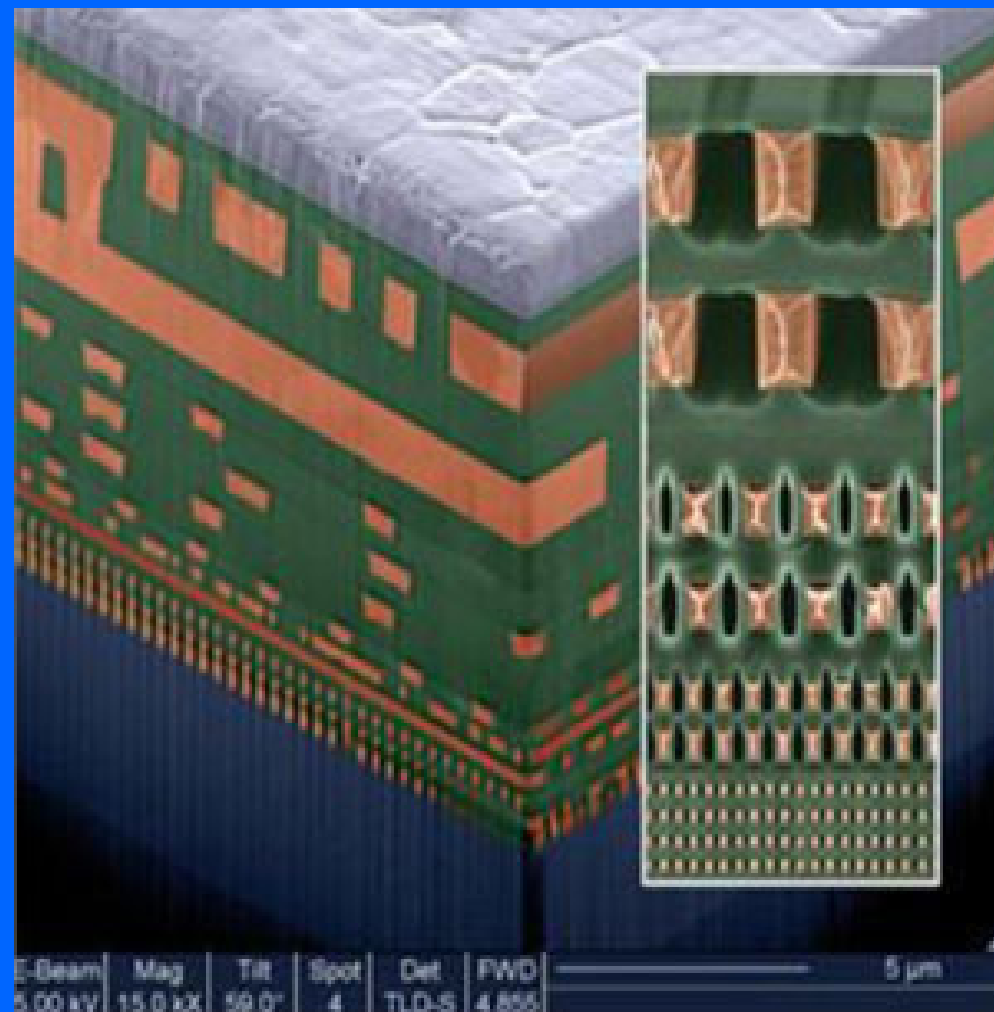
M5

M4

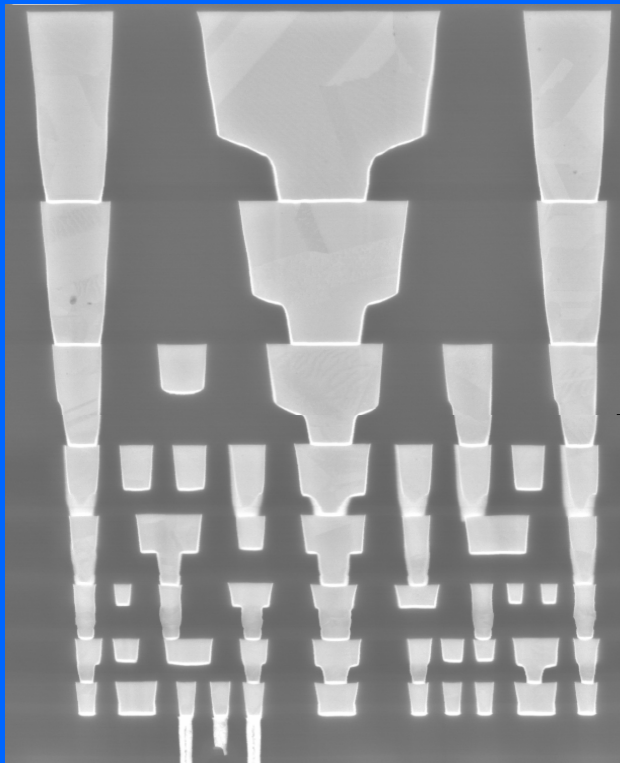
M3

M2

M1



Межсоединения (металлизация) становятся все более сложными



M8

M7

M6

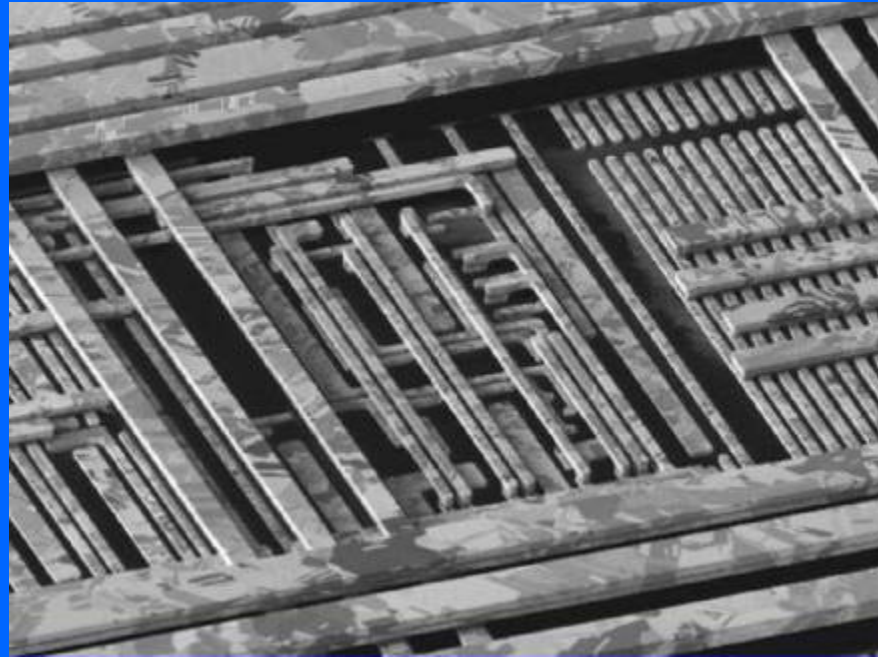
M5

M4

M3

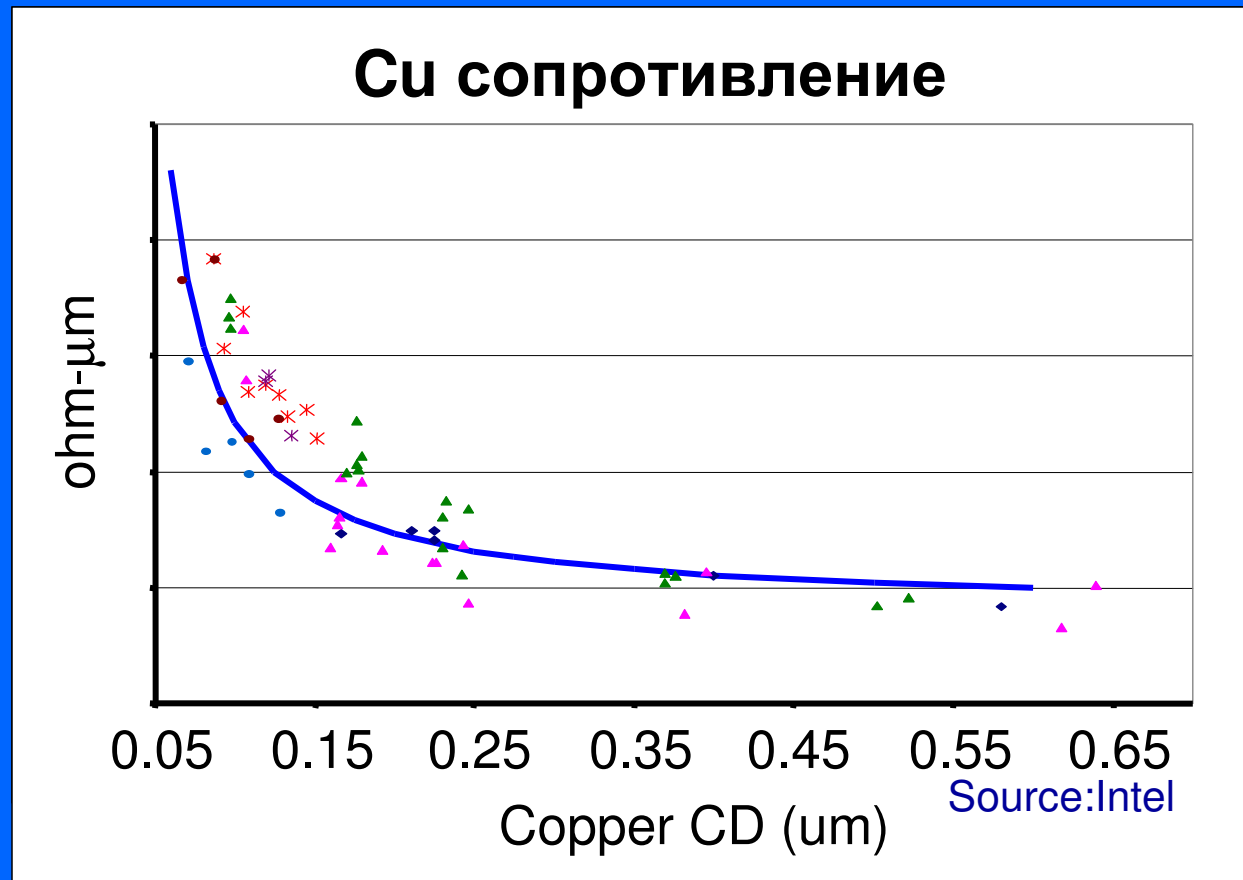
M2

M1



- 9 слоев медных соединений для 45 nm технологий
- Low K диэлектрики для снижения потерь

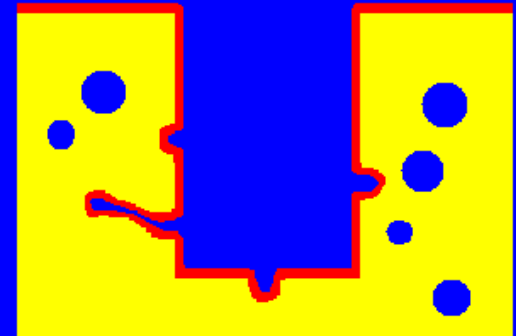
Масштабирование межсоединений



- Эффективное сопротивление возрастает из-за:
 - Рассеяния на границах
 - Рассеяние на поверхности

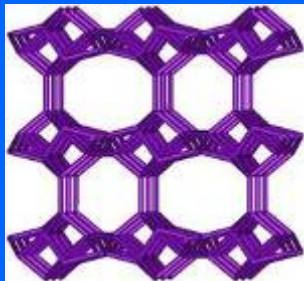
Low K диэлектрик

- Пути уменьшения диэлектрической проницаемости:
 - Пористые материалы (регулярные и нерегулярные)
 - Включение метильных групп
 - Новые полимеры с low K

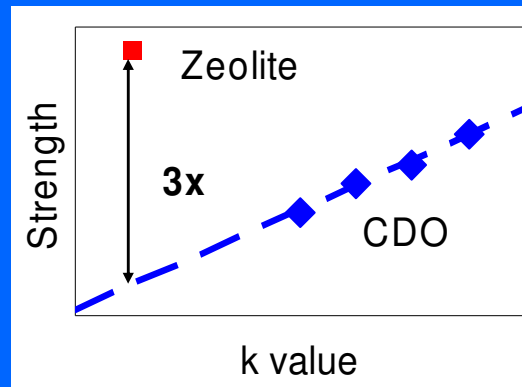


■ ILD

■ ALD Liner



Source: Li et al, UCR, J Phys Chem, 2005



Выводы

- Кремниевые технологии являются основными в современной полупроводниковой технологии и в ближайшие годы закон Мура сохранится как минимум до 2015 года.
- Должны создать новые фоторезисты для дальнейшего развития полупроводниковой индустрии.
- Использование новых материалов и технологий является критическим для продолжения масштабирования межсоединений.

Какие возможности после CMOS?

- Резонансно – туннельные приборы
- Квантовые клеточные автоматы
- Альтернативная логика:

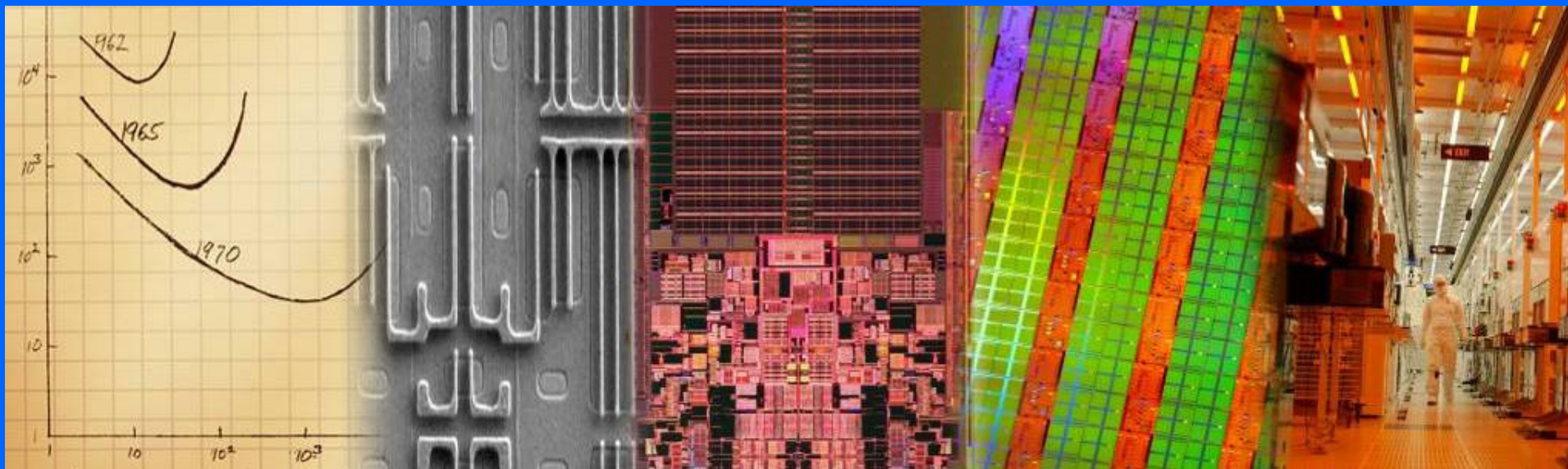
спинтроника

приборы с фазовыми переходами

фотонная логика

Выводы

- Зарядовые вычисления имеют энергетический предел и MOSFET достаточно близок к нему
- Необходимо искать альтернативные методы (не зарядовые) вычислений
- Такие альтернативы должны позволять масштабировать приборы до меньших размеров, требовать меньшую энергию на переключение и быть более «быстрыми»
- Спинтроника, орбитроника и электрические диполи являются наиболее перспективными.



Спасибо