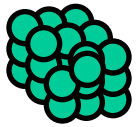
Лекция 2.

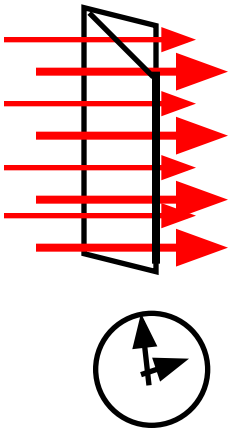
Предельные возможности информатики

«…а есть предел - там, на краю земли,
И можно ли раздвинуть горизонты?!»
В. Высоцкий

Параметры информационной системы

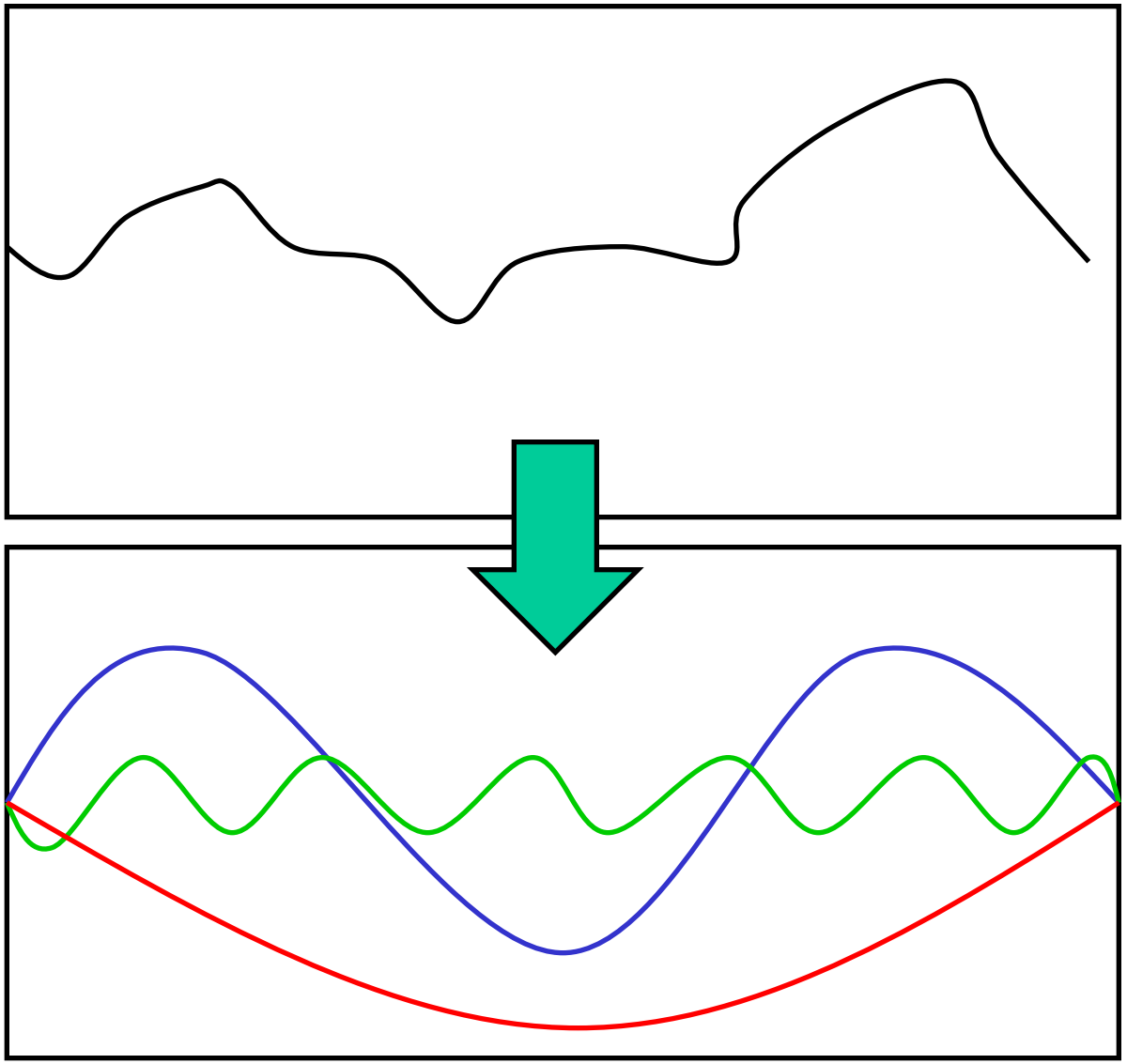
- Мы желаем знать пределы по:
  - плотности информации
    - = бит/см^3
  - потока информации
    - = бит/(см^{2}с)
  - скорости вычислений
    - = операций в секунду





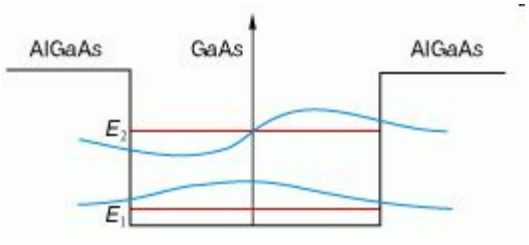
По классической физике нет предела для плотности информации!

Частица в потенциальном ящике



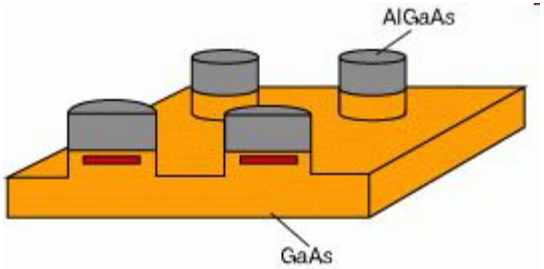
Число квантовых состояний конечно, информационная емкость имеет предел

Квантовая яма, сформированная в слое полупроводника с узкой запрещенной зоной, заключенном между двумя полупроводниками, обладающими более широкой запрещенной зоной (гетероструктура)

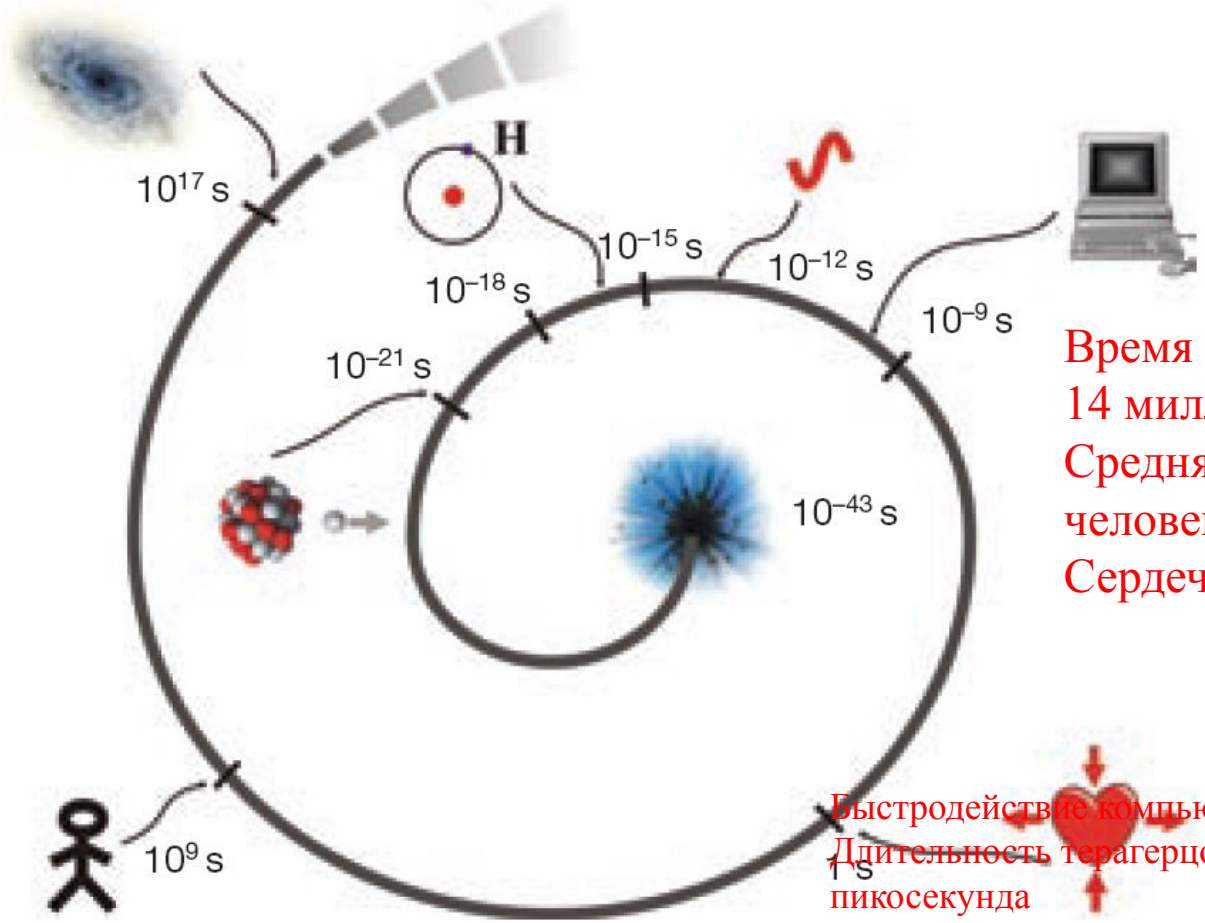


Квантовые точки, сформированные на границе двух полупроводников

500…50 нм 10000 – 100 атомов



Временные масштабы природных явлений



Время жизни вселенной:
14 миллиардов лет = 5 10^{17} с
Средняя продолжительность жизни человека: 70 лет = 2 10^{9} с
Сердечный ритм: 1 с

Быстродействие компьютера: 3 10^{-10} с
Длительность терагерцового импульса: 10^{-12} с = 1 пикосекунда
Период колебания светового поля видимого излучения : 3 10^{-15} с = 3 фемтосекунды
Период обращения электрона вокруг протона в атоме водорода: 1.5 10^{-16} с = 150 аттосекунд (атто – 10(-18)
Сильные ядерные взаимодействия:
10^{-21} с = 1 зептосекунда
Начальная вспышка большого взрыва (время Планка):
10^{-43} с

Kaplan,
Optics and Photonics News,
2005

Физические постоянные:

$c = 2.9979 \cdot 10^{8}$ м с-1,

$\hbar = h/2\pi = 1.0545 \cdot 10^{-34}$ Дж с

$G = 6.673 \cdot 10^{-11}$ м^3 кг -1 с-2.

$k_B = 1.3805 \cdot 10^{-23}$ Дж К$^{-1}$,

$$l = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 1{,}6160(12) \cdot 10^{-35}\, м$$

Длина Планка

$$t = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} = 5{,}3906(40) \cdot 10^{-44}\, с$$

Время Планка

$2{,}176 \times 10^{-5}$ г. ~ 5000 блох

$$m = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2{,}1767(16) \cdot 10^{-8}\, кг$$

Масса Планка

$$r_g = 2Gm/c^2 \qquad \lambda_C = \frac{2\pi\hbar}{mc} = \frac{h}{mc}$$

Частица с такой массой имеет одинаковые радиус Шварцшильда и комптоновскую длину волны, при соответствующей энергии, гравитац. взаимодействие становится сильным и объединяется со слабым, сильным и электромагнитным.

Физика информационных технологий

Нас интересуют ограничения на:

1. **Скорость обработки информации**
2. **Плотность памяти**
3. **Затраченная энергия (отвод тепла)**
4. **Время задержки.**

Сравнение с возможностями человеческого мозга:
Количество нейронов – 10^9
Количество синапсов – 10^5
Время переключения/частота – 0.01 с/100 Гц
Итого: Скорость обработки информации – 10^{16} бит/с
Общий объем памяти: 10^{14} бит
Для ноутбука:
Скорость обработки информации – $3 \cdot 10^9$ бит/с
Общий объем памяти: 10^{12} бит

Энергетический предел передачи информации

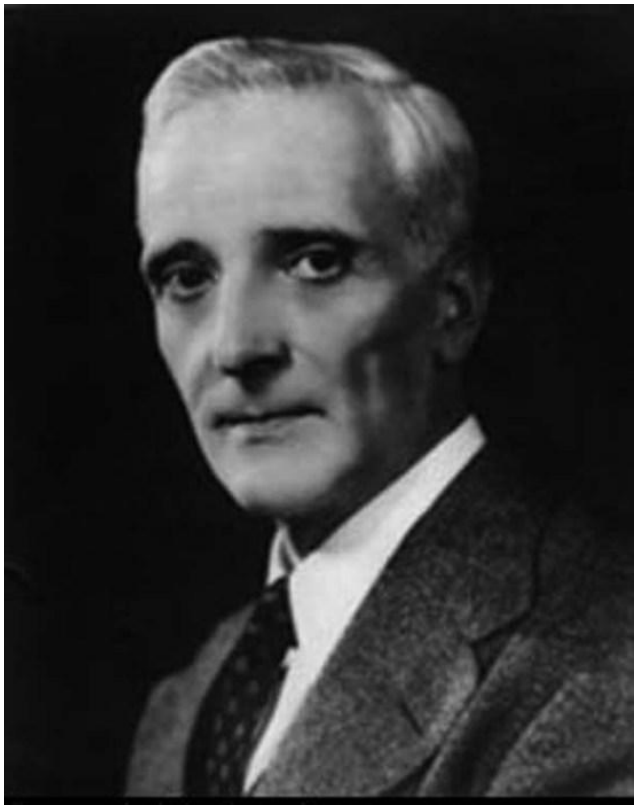
Фундаментальный предел основан на теореме К. Шеннона для максимальной емкости канала связи. Выражение для максимальной емкости для канала с гауссовым источником теплового шума можно вывести следующим образом:

$$(1) \qquad C = \Delta F \cdot \log_2\left(1 + \frac{P_C}{P_Ш}\right)$$

где C - максимальная пропускная способность канала в б/с, ΔF – полоса пропускания канала связи, P_C - средняя мощность сигнала - средняя мощность теплового шума.

Для гауссового источника с тепловым шумом можно записать, что $P_Ш = kT \cdot \Delta F$, где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К константа Больцмана, Т – температура в К°. Тогда можно записать:

$$(2) \qquad C = \Delta F \cdot \log_2\left(1 + \frac{P_C}{kT \cdot \Delta F}\right)$$



Леон Бриллюэн
(1889–1969)***)***

Вычислим среднюю энергию на бит путем деления средней мощности сигнала на скорость передачи информации из (2):

$$E_b^{av} = \frac{P_C}{C} = kT \cdot \frac{\Delta F}{C}\left(2^{\frac{\Delta F}{C}} - 1\right)$$

Вычисляя производную $\dfrac{dE_b}{d\left(\dfrac{C}{\Delta F}\right)}$

и приравнивая её 0 по правилу Лопиталя можно получить:

$$E_b\left(\frac{C}{\Delta F} \to 0\right) = E_b^{\min} = (\ln 2) \cdot kT$$

S = k · ln W,

где S-энтропия, k- постоянная Больцмана, W-термодинамическая вероятность

Демон Максвелла – $\hbar\omega \geq ln2kT$

Предел Бремерманна

Теорема Шеннона для канала с шумом: $C = v_{max} \cdot \log(1 + S/N)$

Ширина полосы квантового канала ограничена

$$v_{max} = E_{max}/h \leq mc^2/h,$$

где – E_{max} **максимальная энергия в системе**

Для квантовых систем с белым шумом

$$S/N = 4\pi$$

Тогда

$$C = mc^2/h \cdot \log(1 + 4\pi)$$

Для одного грамма вещества

$C = 2.7 \cdot 10^{47}$ *бит/гр сек*

(1926–1996)

Hans J. Bremermann Minimum Energy Requirements of Information Transfer and Computing ***International Journal of Theoretical Physics, Vol. 21, Nos. 3/4, 1982 (Доклад в 1962)***

Предельная скорость обработки информации

Seth Lloyd

Каковы вычислительные возможности компьютера с массой 1 кг, занимающего объем 1 литр, размер условного ноутбука?

http://www.abitura.com/modern_physics/computer.html СИНГУЛЯРНЫЙ КОМПЬЮТЕР Сет Ллойд, Джек Энджи

Теорема Марголиса–Левитина

Марголис и Левитин доказали теорему о том, что общее количество элементарных действий, которые система может выполнить в секунду, ограничено энергией:

$$v_{\perp} \leq 4(E - E_0)/h$$

– where:

- E = average energy (expectation value of energy over all states, weighted by their probability)
- E_0 = energy of lowest-energy or *ground* state of system
- h = Planck's constant (converts energy to frequency)

- Margolus N., Levitin L.B. Phys. Comp. 96. T. Toffoli, M. Biafore, J. Leao, eds. (NECSI, Boston) 1996; Physica D 120, 188-195 (1998).

Для совершения элементарного действия за время Δt требуется энергия $E \geq \pi\hbar/2\Delta t$ *(соотношение неопределенности)*. Соответственно, система со средней энергией E может исполнить максимум $2E/\pi\hbar$ логических операций в секунду.

1 килограммовый компьютер обладает полной энергией

$$E = mc^2 = 8.9874 \cdot 10^{16} \text{ Дж.}$$

Соответственно, такой ноутбук может выполнить максимум $5.4258 \cdot 10^{50}$ действий в секунду.

Aharonov, Y. & Bohm, D. Time in the quantum theory and the uncertainty relation for the time and energy domain. *Phys. Rev.* **122,** 1649–1658 (1961).

Lloyd, S. Ultimate physical limits to computation. http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/9908043, 1999.

Предельная плотность записи информации

Современное состояние: 10^{12}бит/см^3

Молекулярный уровень: число Авогадро

6.0221415×10^{23} (кол-во атомов C_{12} в 12 г) …1,9 г/см^3

~ 10 атомов на бит,

ДНК – 32 атома на бит

N ~ 10^{21} бит/см^3

Атомарный уровень: число ядер

Карликовые звезды 10^6 г/см^3

изотопы C^{13} C^{12} в кубической кристаллической структуре

N ~ 10^{27} бит/см^3

Нейтронные звезды 10^{17} г/см^3

Уровень кварков и андронов : несколько кварков на бит N ~ 10^{40} бит/см^3

Предельный объем памяти

Термодинамика дает верхний предел объема памяти в системе с энергией E

$$I = \frac{E}{k_b T \ln 2} + \log_2 \left(\sum_i e^{-E_i/k_B T} \right)$$

Для системы частиц с общей энергией E в объеме V число мод

$$I = \frac{4}{3 \ln 2} \left(\frac{\pi^2 r V}{30 \hbar^3 c^3} \right)^{1/4} E^{3/4}$$

r – число частиц и их состояний

На 1 кг фотонов (энергией 10^{16} Дж) в объеме 1 литр $I = 2.13 \cdot 10^{31}$ бит.

Поскольку объем и энергия ограничены, соответственно ограничено фазовое пространство системы. Из-за неопределенности кванта, фазовое пространство не может быть разделено на произвольно маленькие части (если частицы слишком малы, они не могут закодировать информацию).

Bekenstein, J. D. Energy cost of information transfer. *Phys. Rev. Lett.* **46,** 623–626 (1981).
Bekenstein, J. D. Universal upper bound on the entropy-to-energy ration for bounded systems. Phys.Rev. D 23, 287–298 (1981).

При температуре T, энтропия определяется материальными точками с массой

$$k_B T/2c^2$$

Такая точка обладает энергией $E = r_\ell \pi^2 V (k_B T)^4 / 30\hbar^3 c^3$

и энтропией $S = 2 r_\ell k_B \pi^2 V (k_B T)^3 / 45\hbar^3 c^3 = 4E/3T,$

Тогда каждая частица вносит $(2\pi)^5 r_\ell / 90 \ln 2 \approx 10^2$ бит

В объеме $\lambda_T^3,$ где $\lambda_T = 2\pi\hbar c / k_B T.$

В итоге получаем

$$S = (4/3) k_B (\pi^2 r V / 30\hbar^3 c^3)^{1/4} E^{3/4} = k_B \ln(2) I$$

Какова информационная емкость Вселенной?

Масса Вселенной

$$M_{Bc} = \frac{4\mathrm{g} r_{\oplus} e^2 c}{10 G m_e^2} = \frac{2\mathrm{g} r_{\oplus} c}{5} \frac{e^2}{G m_e^2} =$$

$$= \frac{2 \cdot 9{,}8065 \cdot 4{,}4368 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}997925 \cdot 10^{8} \cdot \left(5{,}2727 \cdot 10^{17}\right)^2}{5 \cdot 6{,}67157 \cdot 10^{-11}} =$$

$$= 2{,}174 \cdot 10^{52} (кг) = 1{,}093 \cdot 10^{22} M_{\otimes}.$$

$$2{,}174 \cdot 10^{52} \cdot 2{,}13 \cdot 10^{31} = 4{,}631 \cdot 10^{83} \text{ бит}$$

Предел Смита-Ллойда

Smith ‘95
Lloyd ‘00

$$\frac{S}{V} \le \left(\frac{q}{2}\right)^{1/4} \frac{16\sqrt{\pi}}{3 \cdot 60^{1/4}} \left(\frac{c}{\hbar} \cdot \frac{M}{V}\right)^{3/4}$$

S = энтропия, M = масса, V = объем, q = число возможных состояний (для фотона 2 состояния поляризации)

Плотность энтропии возрастает пропорционально $M^{3/4}$, т.е.возрастание плотности памяти в 1000 раз требует увеличение плотности энергии в 10000 раз.

Примеры предела Смита-Ллойда

- Для системы с плотностью воды (1 г/см^3), состоящей только из фотонов:

1 м^3 содержит 6×10^{34} бит = 60 Кб/Å^3

1 Å^3 соответствует атому водорода

Однако!!!

– Такая плотность требует гигантских температур и плотности!

– Температура ~ 5 10^9 Кельвинов!!

– Давление фотонов ~ 10^{16} атм!!

“Like a miniature piece of the big bang.” – Lloyd

«Подобно миниатюрному кусочку Большого взрыва»

Более нормальная температура

- Возьмем более приемлемую температуру: 1356 K (точка плавления меди):
  - Плотность информации с использованием фононов только 0.74 бит/мкм^3!
    - Меньше чем в DRAM!
  - Размер бита определяется длиной волны излучения черного тела с температурой плавления меди
  - Таким образом, фононы не являются оптимальной средой для памяти при обычных температурах

Пределы общей теории относительности

- Предел Бекенштейна (Bekenstein) на основе физики «черных дыр»

  $S < 2\pi ER / \square c$ $\quad I \leq \frac{2\pi ER}{\hbar c \ln 2}$

  E = общая энергия

  R = радиус системы

4×10^{39} бит/Å^3
средняя плотность
1-м радиуса
черной дыры с массой
Сатурна!

- Предел достигается только для «черной дыры»!
  - «Черная дыра» обладает потенциалом информации 1/4 нат на площади, соответствующей квадрату длины Планка по поверхности (горизонту событий)!
  - Минимальный размер бита: 2 длины Планка (квадрат).

The Holographic Bound

- Based on Bekenstein black-hole bound.
- The maximum entropy within *any* surface of area A (independent of energy!) is

$$A/(2L_P)^2$$

  – L_P is Planck length (see lecture on units)
- Implies any 3D object (of any size) could be completely defined via a flat (2D) "hologram" on its surface having Planck-scale resolution.
- Bound is only really achieved by a black hole with event horizon=that surface.

Ограничения

Для солнечной системы предел Бекенштейна: (M = 2 $\cdot 10^{30}$ кг, R = 7,375 $\cdot 10^{9}$ m) 3,8 $\cdot 10^{83}$ бит. Bekenstein, J. Phys Rev D 23 287 (1981).

Если радиус меньше $2GM/c^2$ формируется черная дыра, тогда информационная плотность

$$\rho \leq \frac{3kc^4}{16\pi G^2}\frac{1}{M}$$

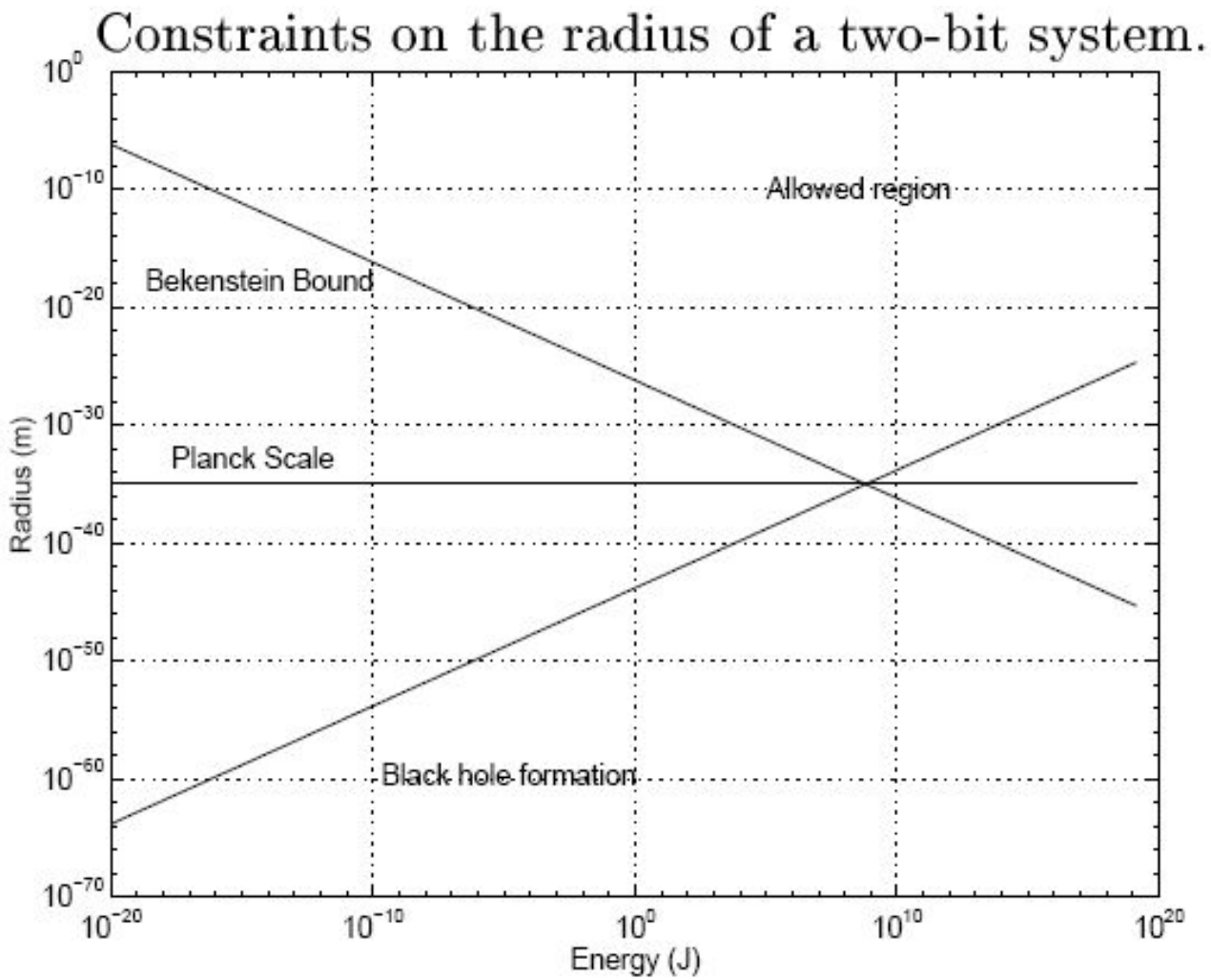
Рождение электрон-позитронных пар при

$$\nu = \frac{2m_e c^2}{h}$$

Радиус Шварцильда

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Пределы для радиуса информационной системы



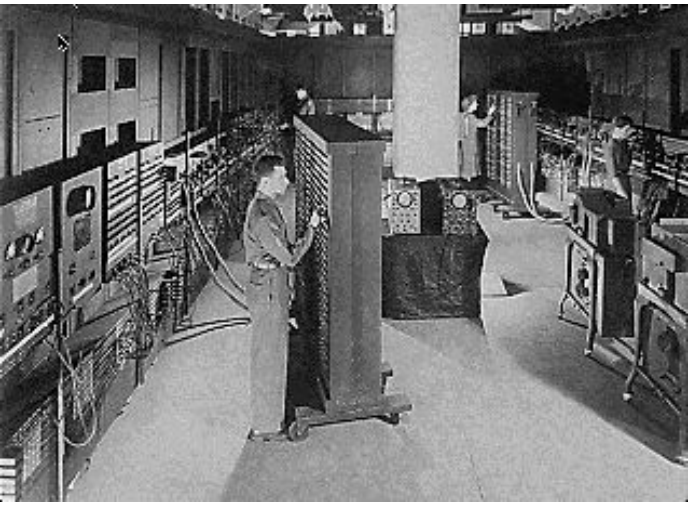
Bekenstein, J. Phys Rev D 23 287 (1981).

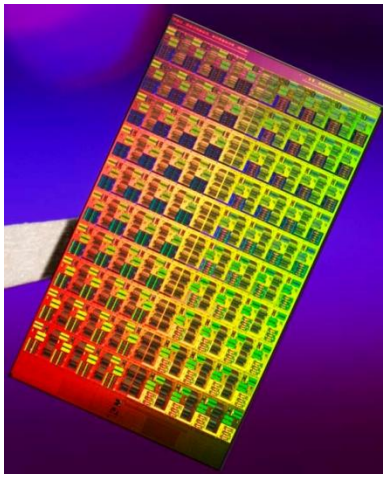
Summary of Fundamental Limits

Fundamental principle	Constrained quantity	Symbol	Quantitative constraint	Impact on our model
Quantum mechanics	Entropy density	ρ_S	$\lesssim$ 1–10 b/Å^3?	Finite state/ processor
	Entropy flux	F_S	$\leq \rho_S v$	Finite info. flux
	Rate of state change	$\nu_\perp$	$\leq 4(E - E_0)/h$	Finite oper. frequency
Locality	Info. prop. velocity	v	$\leq c \approx 3\times10^8$ m/s	Mesh arch. (Vitányi '88)
3-dimensionality of space	Connec-tivity		$\mathcal{O}(t^3)$	3-D mesh
Micro-reversibility, thermodynamics	Entropy change	ΔS	≥ 0 always, ≥ 1 bit/bit erasure	Logical reversibility, entropy accounting
	Energy dissipation	ΔE	≥ 0 always, $\geq k_B T \ln 2$/eras.	
Frictional effects	Entropy coefficient	k_S	> 0 b/Hz?	Time-prop. reversibility

Лекция 3 Предельные возможности электронной вычислительной техники

1944 г.	2000 г.	2015 г.	?
18 000 ламп	42 млн. транзисторов	10 млрд.	?





«Жиан Жиакомо, заведующий отделом Универсальных Превращений, вначале тоже обрадовался, но, убедившись, что «Алдан» не способен рассчитать даже элементарную трансформацию кубика свинца в кубик золота, охладел к моей электронике и удостаивал нас только редкими случайными заданиями.»

А.Н. Стругацкий, Б.Н. Стругацкий «Понедельник начинается в субботу»

Transistor count

2,600,000,000
1,000,000,000
100,000,000
10,000,000
1,000,000
100,000
10,000
2,300

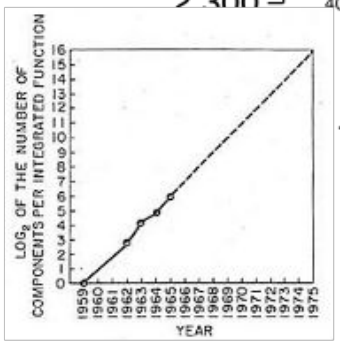
curve shows transistor count doubling every two years

16-Core SPARC T3
Six-Core Core i7
Six-Core Xeon 7400
10-Core Xeon Westmere-EX
Dual-Core Itanium 2
8-core POWER7
Quad-core z196
Quad-Core Itanium Tukwila
8-Core Xeon Nehalem-EX
AMD K10
POWER6
Itanium 2 with 9MB cache
Six-Core Opteron 2400
AMD K10
Core i7 (Quad)
Core 2 Duo
Cell
Itanium 2
AMD K8
Barton
Atom
Pentium 4
AMD K7
AMD K6-III
AMD K6
Pentium III
Pentium II
AMD K5
Pentium
80486
80386
80286
68000
80186
8086
8088
8085
6800
6809
8080
Z80
8008
MOS 6502
4004
RCA 1802

1971
1980
1990
2000
2011

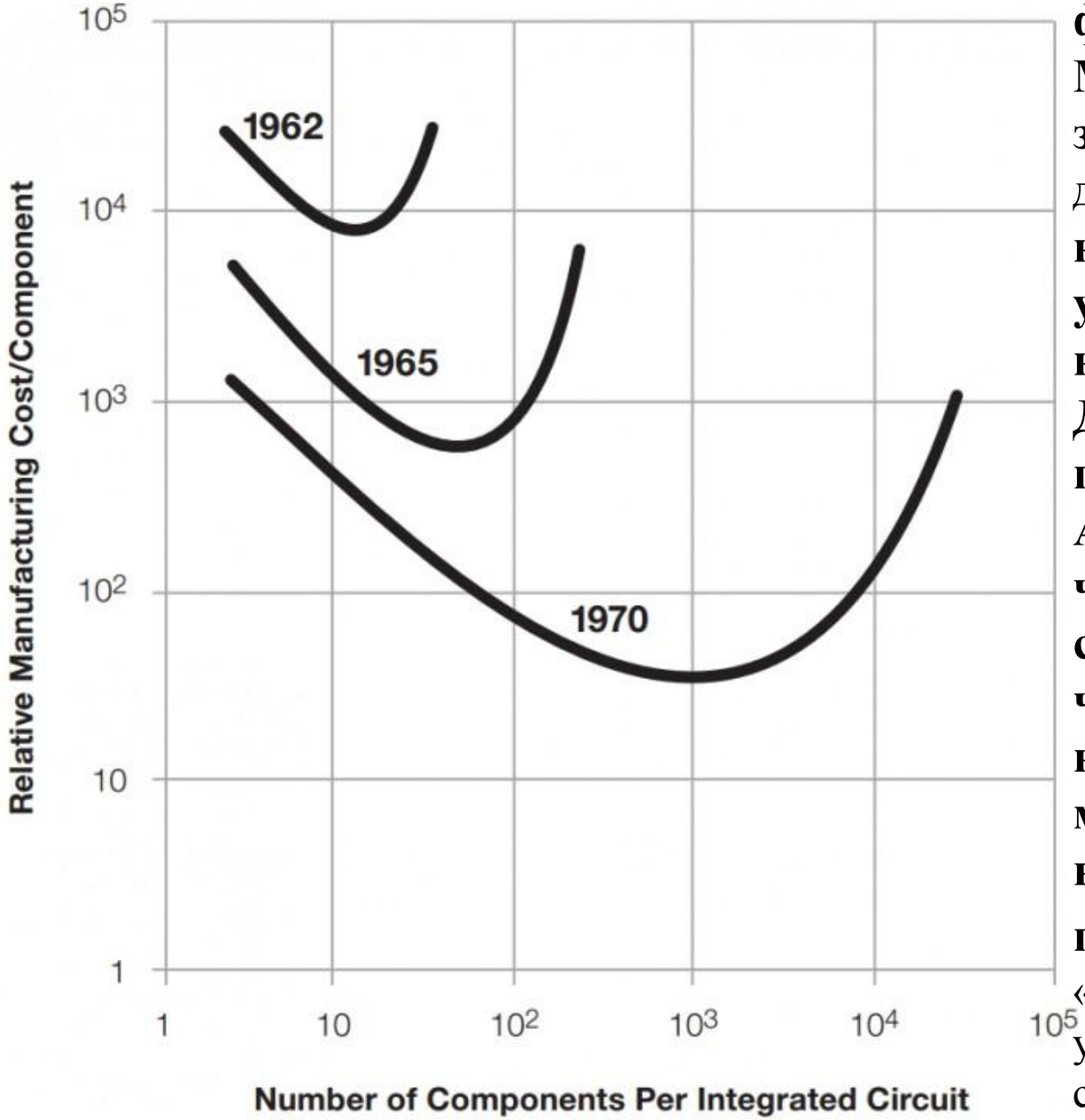
Date of introduction

Intel® Xeon Phi™ Coprocessor 7120X
(16GB, 1.238 GHz, 61 core)
Апрель 2013



«Зададимся, однако, вопросом: как долго еще продлится компьютерная революция? Если закон Мура продержится еще лет пятьдесят, то компьютеры, скорее всего, намного превзойдут по возможностям человеческий мозг. Но к середине века возникнет другая динамика. Как сказал Джордж Харрисон, «все проходит». И действие закона Мура должно прекратиться, а с ним — впечатляющий рост компьютерных мощностей, питавший последние полвека рост мировой экономики.»

М. Каку, *Физика будущего*. — М.: Альпина Нон-фикшн, 2012 г.



Оригинальная формулировка Закона Мура из статьи 1965 года звучит так: сложность для самых дешёвых компонентов увеличивается вдвое каждый год.

Джон Густафсон, главный архитектор AMD по графической части (бывший сотрудник Intel), заявил, что в погоне за всё более крупными микросхемами мы вышли на финишную прямую.

«Производительность увеличивается в лучшем случае на 10 процентов за год»

Три основных фундаментальных предела характеристик логической ячейки на основе электронной техники могут быть определены из основных законов термодинамики, квантовой механики и электромагнитной теории

P_N – тепловые шумы (Джонсона –Найквиста)

равновесные шумы, обусловленные тепловым движением носителей заряда в проводнике, в результате чего на концах проводника возникает флуктуирующая разность потенциалов.

Среднеквадратичное напряжение теплового шума дается формулой Найквиста:

$$\overline{U_T^2} = S_{TU}(0)\,\Delta f = 4kTR\Delta f$$

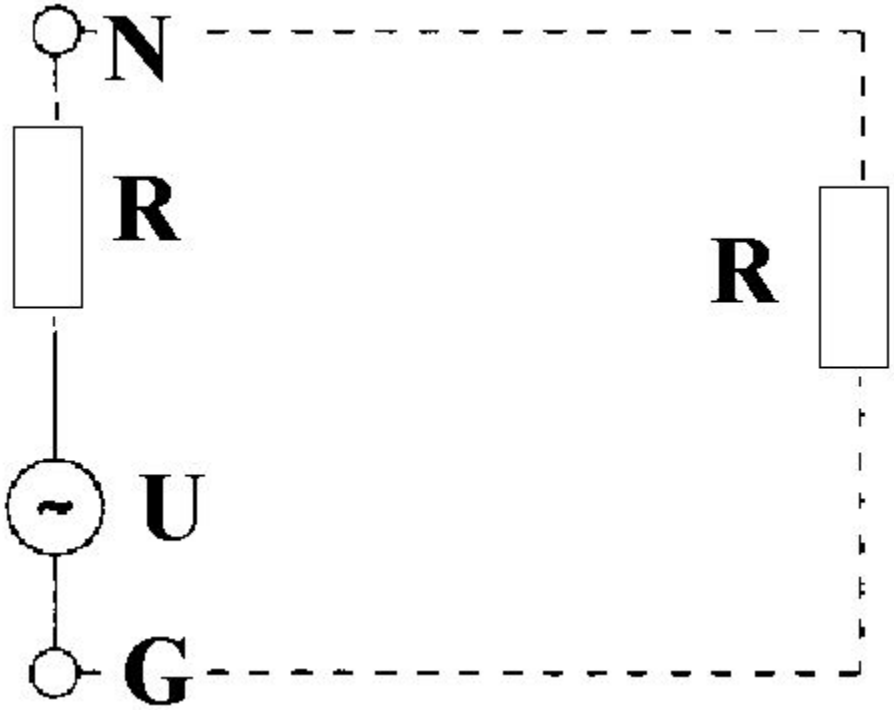
$$\mathbf{P_N = U_T^2/4R}$$

1) постоянная составляющая шума равна нулю;

2) мгновенные значения напряжения на оси времен распределены по нормальному закону (по крайней мере, для проводников содержащих достаточно большое число носителей);

3) уровень теплового шума не зависит от материала проводника.

Термодинамический предел по мощности элементарной логической ячейки



$P_N = kT\Delta f \quad E_N = kT$

$E_S > \gamma E_N = \gamma kT$

$T = 300K \qquad \gamma \geq 4$

$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

$E_S > 1{,}66 \cdot 10^{-20}$ Дж $= 0{,}104$ eV

$$Pr(E_n > E_s) = \exp(-E_s/kT)$$

Использование формулы Найквиста на практике

$$\overline{U_T^2} = S_{TU}(0)\,\Delta f = 4kTR\Delta f \quad , \text{ В}^2$$

♦ Для T_0=300К формулу Найквиста после подстановки в нее $4kT_0 = 1{,}6 \cdot 10^{-20}$ Вт · с можно привести к виду:

$$\sqrt{\overline{U_T^2}} = U_T = 1{,}26 \times 10^4 \sqrt{R\Delta f}, \qquad \text{мкВ}$$

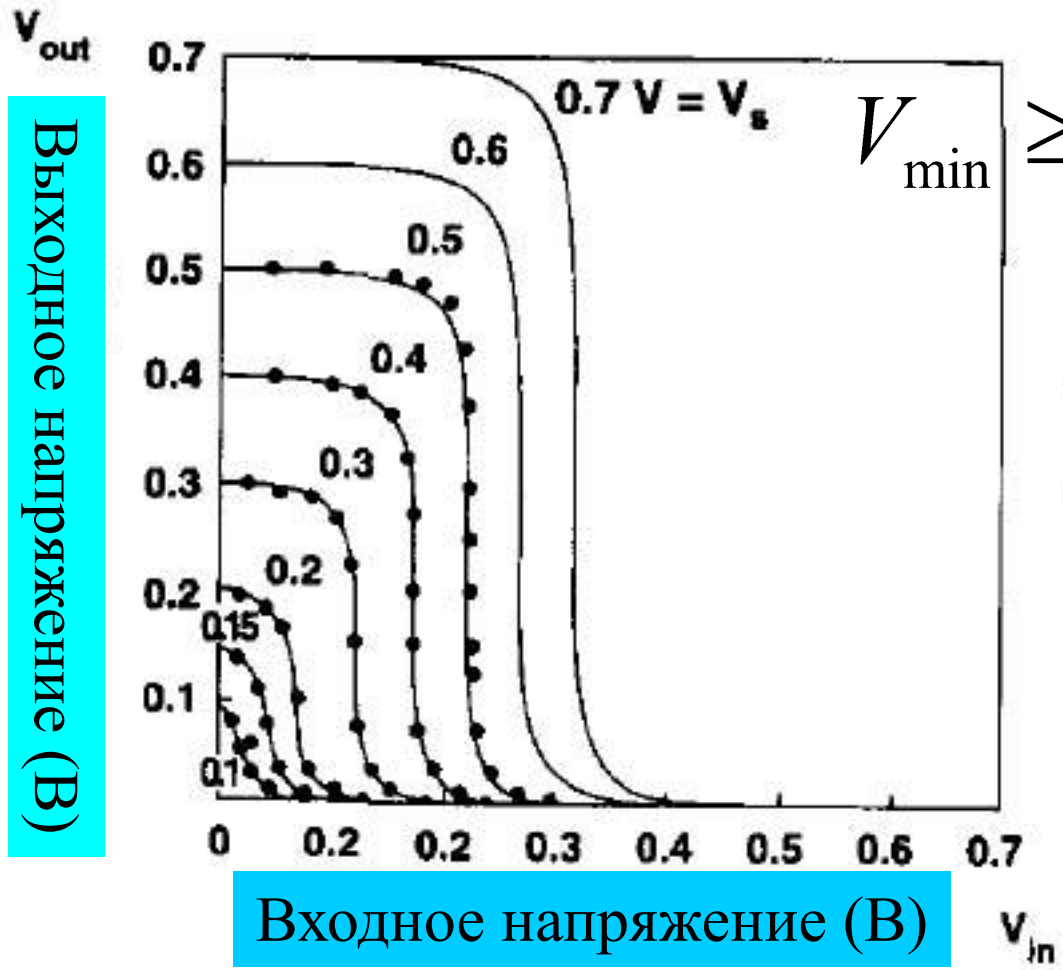
U_T – действующее значение напряжения теплового шума;

R – сопротивление, Ом; Δf –полоса частот, Гц.

♦Формулой удобно пользоваться на практике.

♦Например, для $R = 10^5$ Ом, $\Delta f = 10^9$ Гц $U_T = 1$ *В* .

Передаточная кривая КМОП транзистора

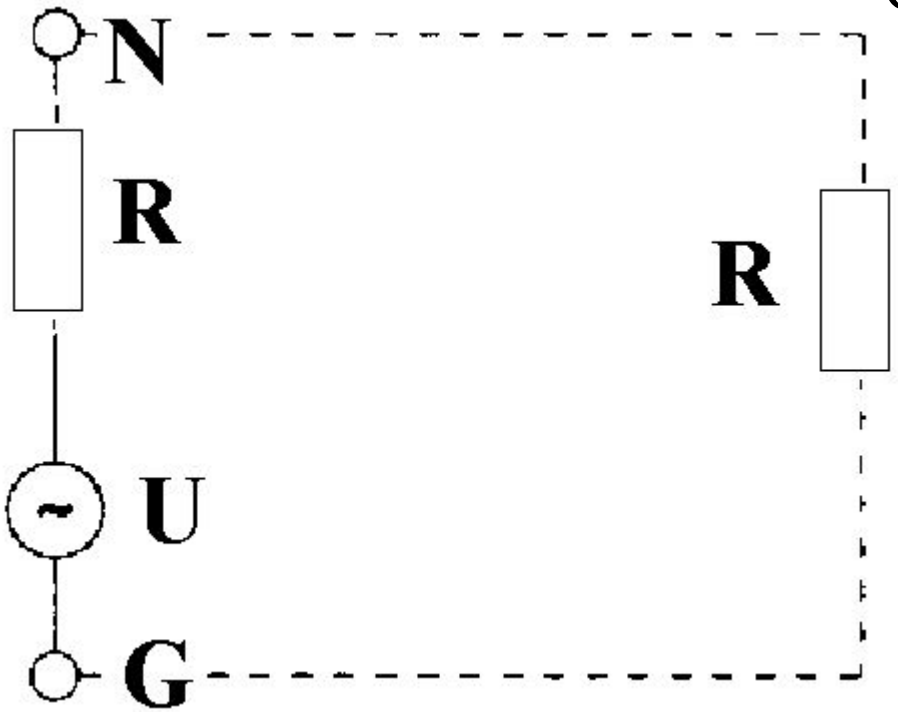


$$V_{\min} \geq \frac{\gamma kT}{e} \approx 0.1B$$

Эксперимент

Теория

Квантовый предел по мощности элементарной логической ячейки



Соотношение неопределенностей Гейзенберга
(Теорема Марголиса–Левитина)

$$\Delta E \geq \pi\hbar/2\Delta t$$

$$P \geq \frac{\pi\hbar}{2(\Delta t)^2}$$

$$\hbar = 1.055 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с$$

Нулевые флуктуации (колебания) вакуума - в согласии с принципом неопределённости, в физическом вакууме постоянно рождаются и исчезают виртуальные частицы (спонтанная эмиссия фотонов – КР рождается из КФ)

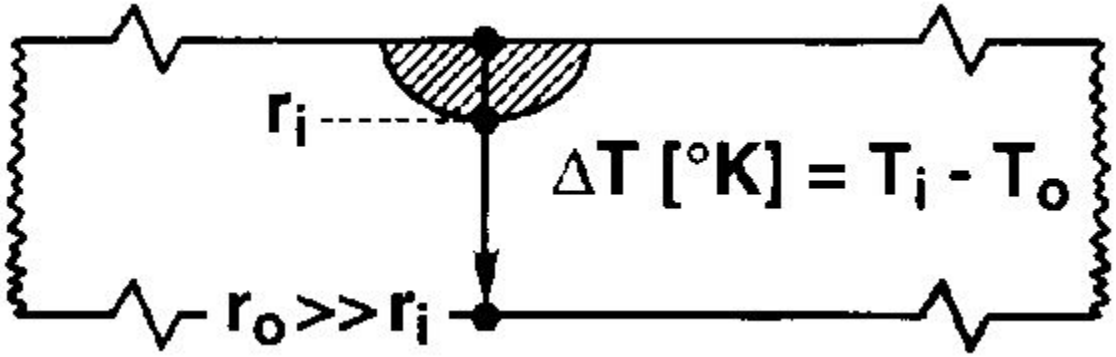
Третий фундаментальный предел связан со скоростью распространения электрического импульса по микрочипу v, который не может быть больше скорости света в вакууме c :

$$v = \frac{L}{\Delta t} \leq c_0$$

(где L – длина межсоединения между ячейками. Из (7) можно оценить предельную тактовую частоту микропроцессора размером 1×1 см2 – минимальная длина межсоединений в таком чипе (длина по диагонали) Lmin = √2 ≈ 1,41 см, соответственно

$\Delta t_{min} \approx L_{min}/c_0 \approx 47$ пс и $f_{max} \approx 22$ ГГц.

Ограничение, связанное с отводом тепла от элементарной ячейки



Закон теплопроводности Фурье

A – площадь

P – полная мощность тепловых потерь, Дж/с

K – коэффициент теплопроводности

$$P = -KA\frac{\Delta T}{r_i}$$

$$A = \pi r_i^2 = \pi(v_s t_d)^2$$

$$P = \pi K \upsilon_s \Delta T t_d$$

v_s – скорость носителей, t_d – время переключения

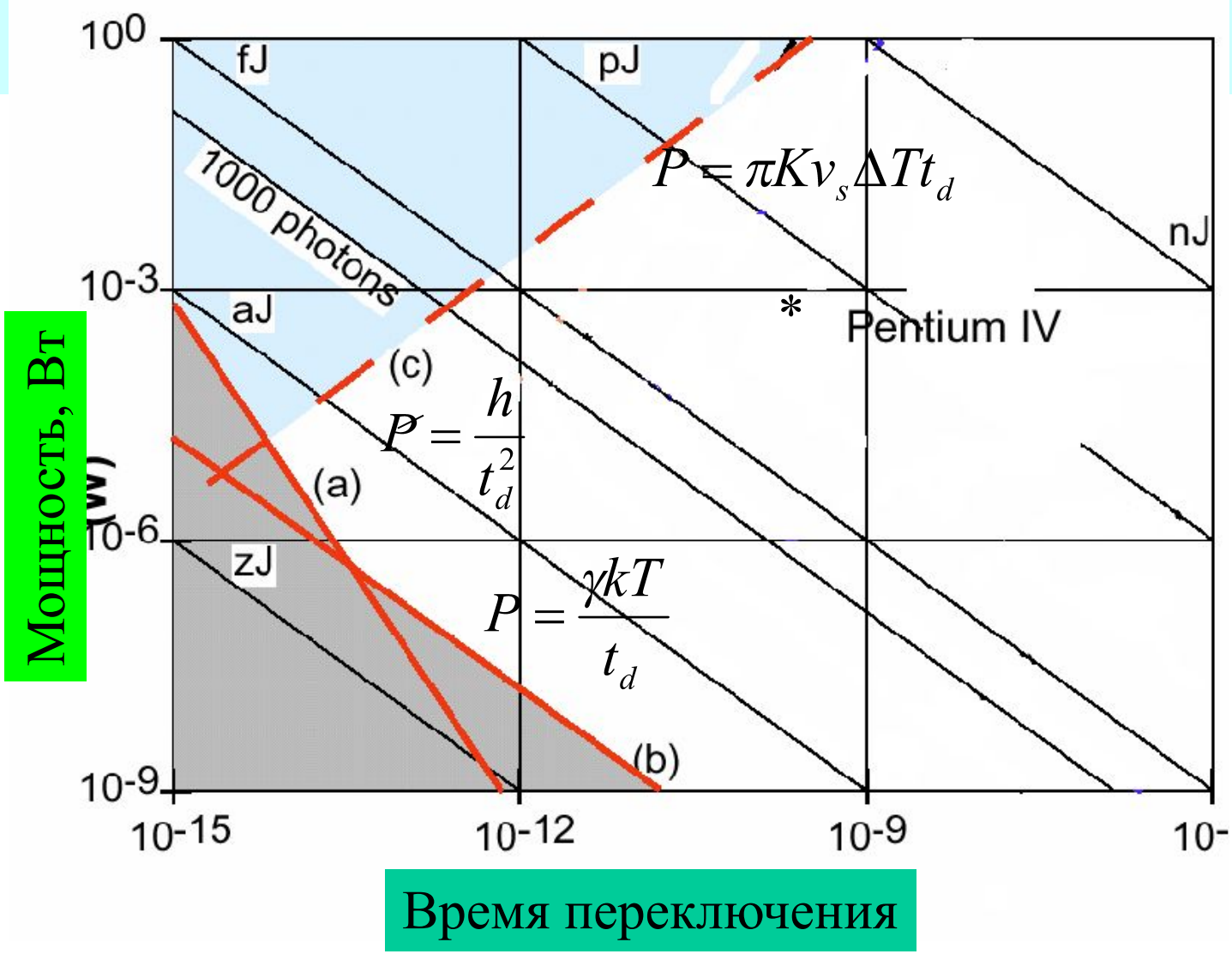
P – мощность, отводимая от ячейки

$$K_{Si} \approx 1\frac{Вт}{см \cdot град}$$

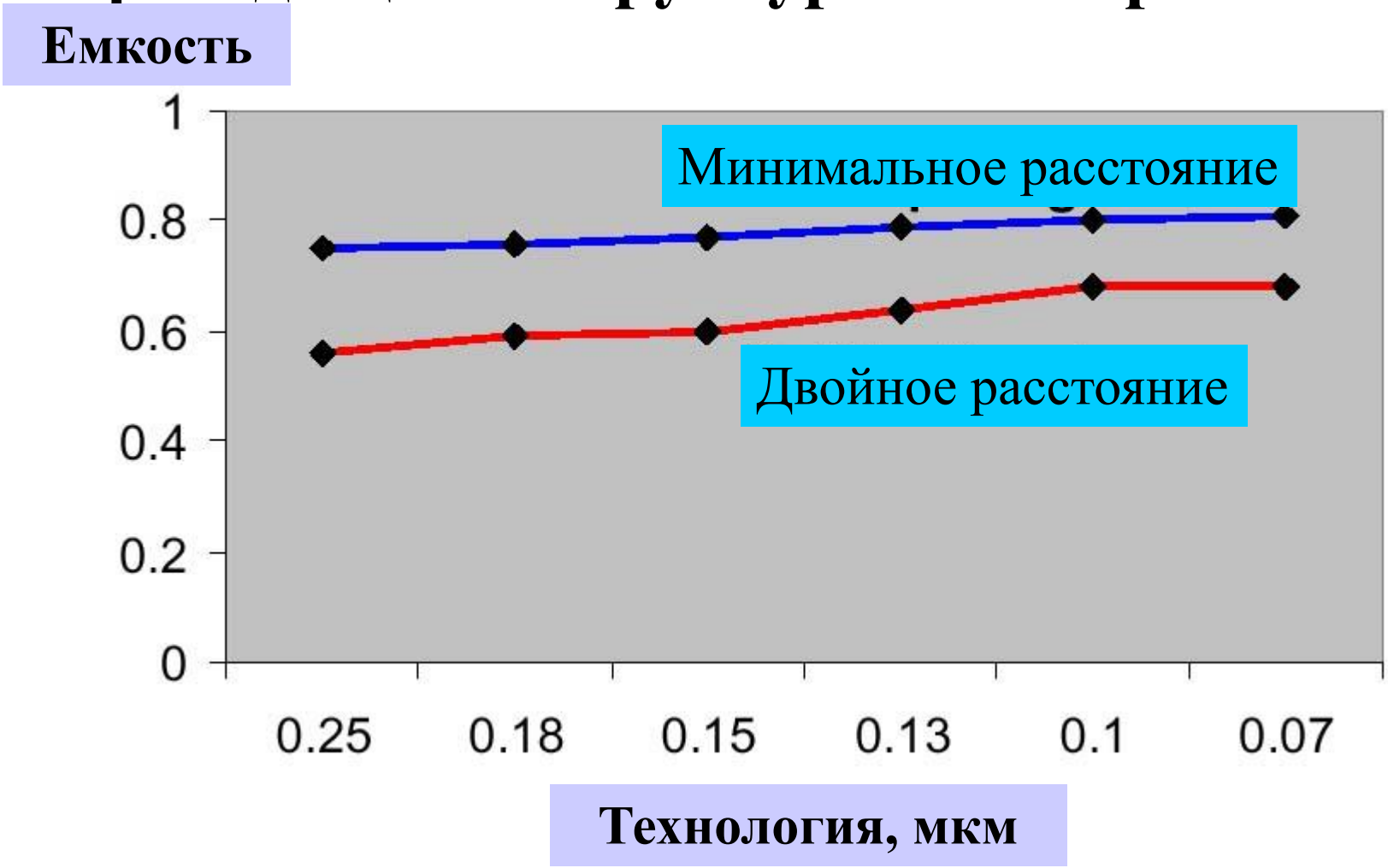
$$\Delta T \approx 100^0 C \qquad v_s \sim 10^7 \text{ см/с}$$

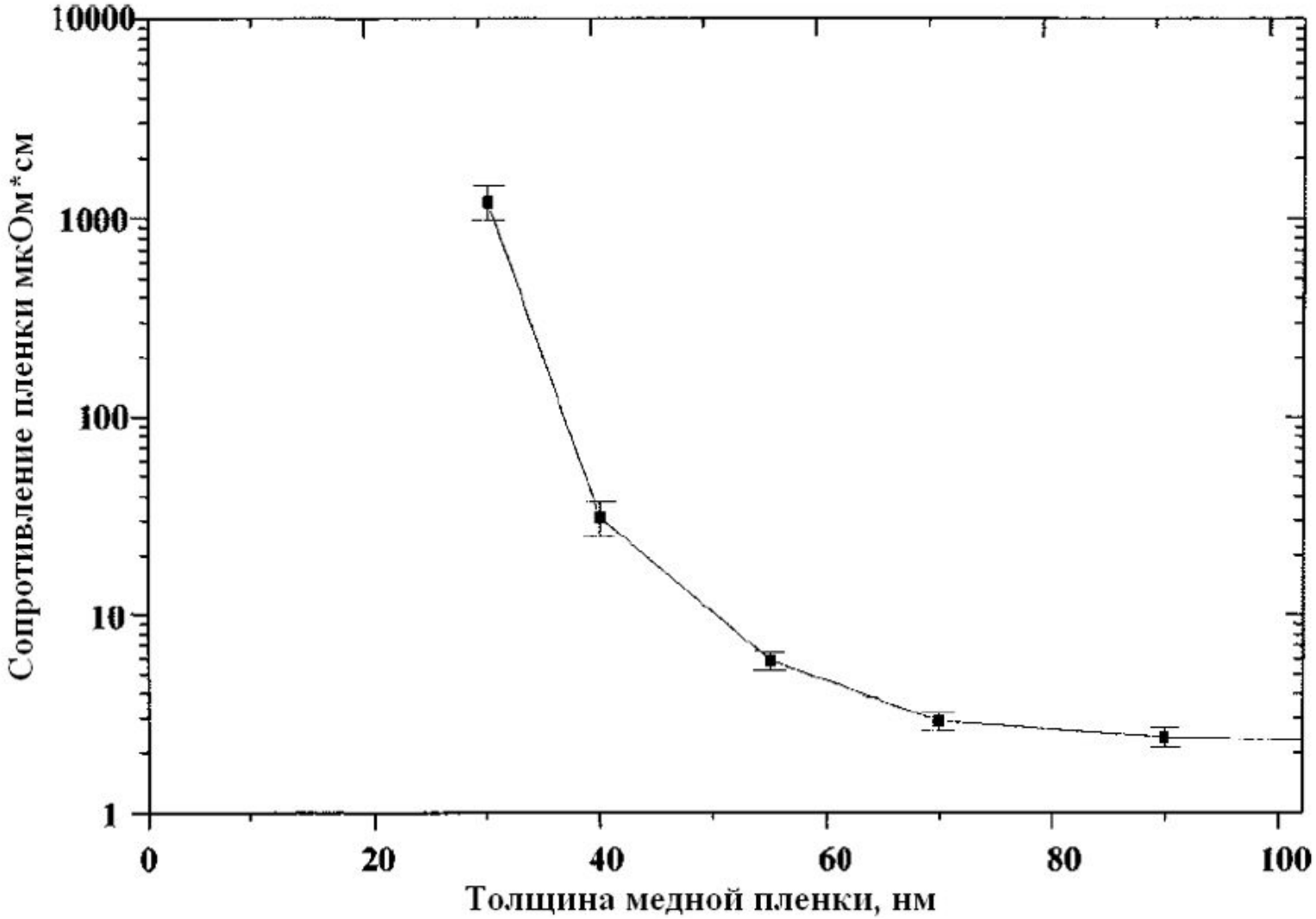
Фундаментальные пределы современной компьютерной техники.

Зависимость мощности, затрачиваемой на одно переключение, от времени



Технологическая зависимость относительной величины емкости между двумя проводящими структурами микрочипа





Рост удельного электрического сопротивления медной пленки с уменьшением её толщины.

ВЛИЯНИЕ ЕМКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВОГО МИКРОЧИПА

Энергия на зарядку емкости микрочипа

$$E = \frac{CU^2}{2}$$

C – емкость остается практически неизменной от технологии

U – напряжение на микрочипе не может быть меньше 0.1 В (0.5…1 В)

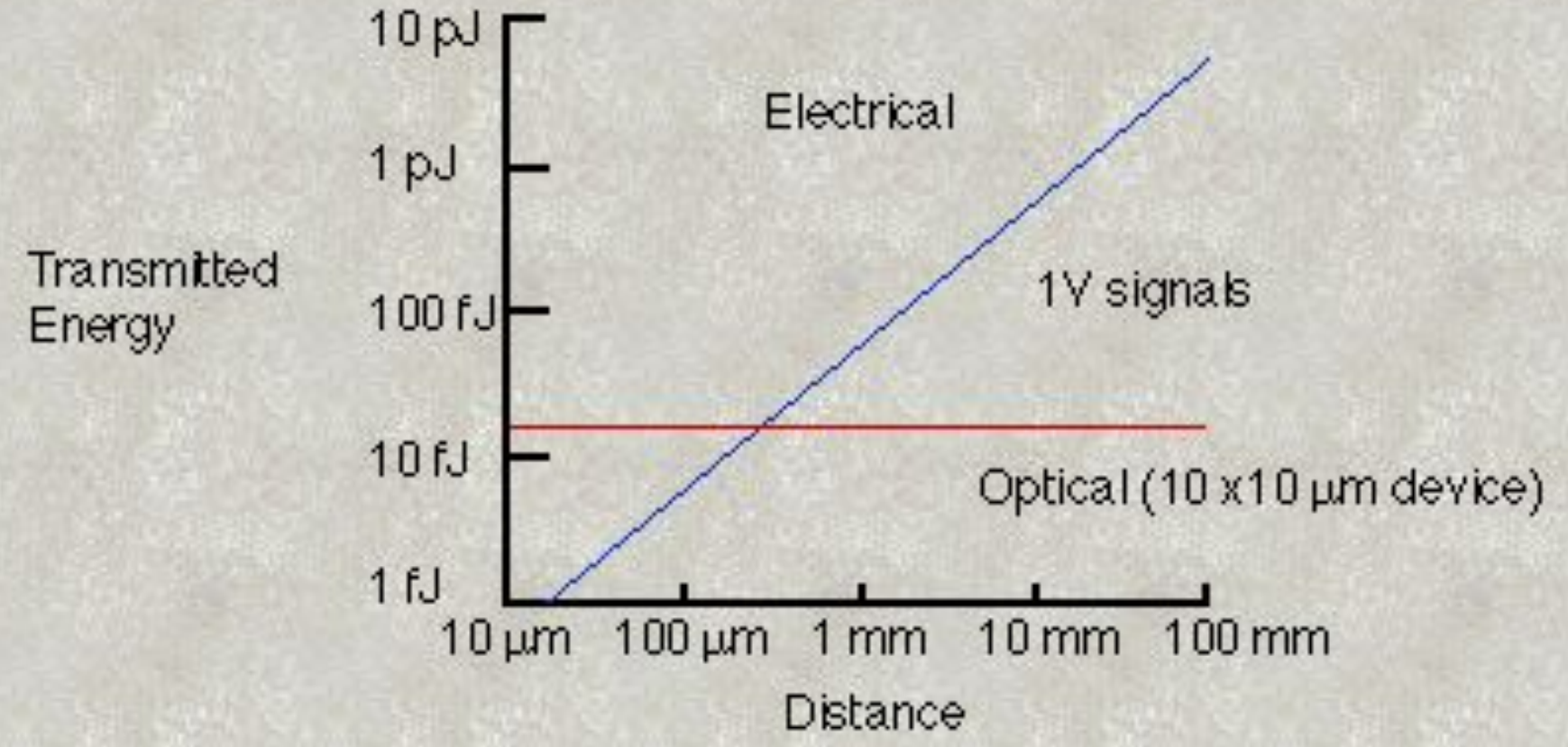
Время на зарядку RC цепей микрочипа

$$\tau = R_\Sigma C$$

R_Σ – сопротивление увеличивается с уменьшением характерного размера микрочипа и ростом тактовой частоты

Рассеиваемая мощность ($E*\tau$) будет расти с уменьшением характерного размера микрочипа

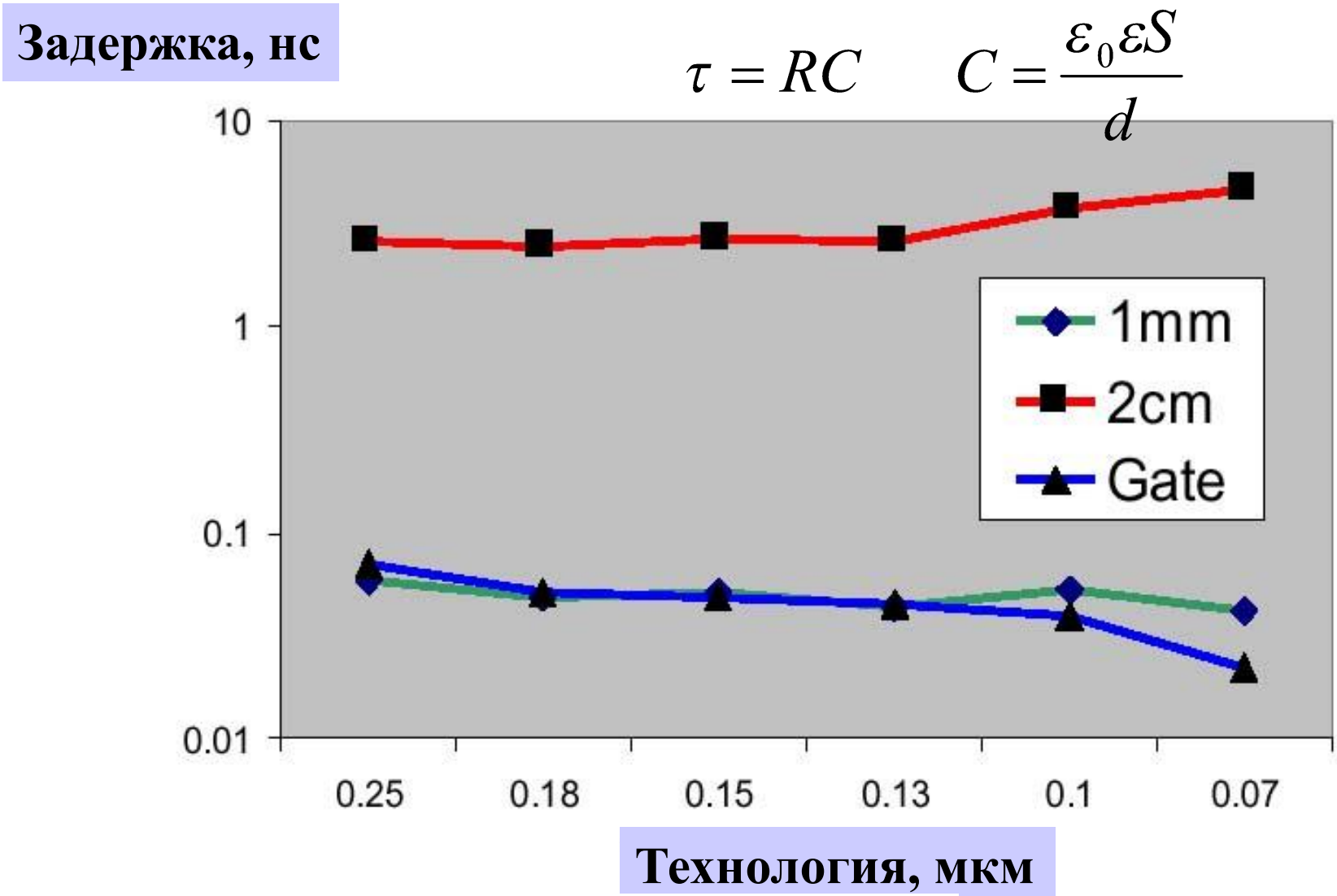
Energy for Optical and Electrical Communications



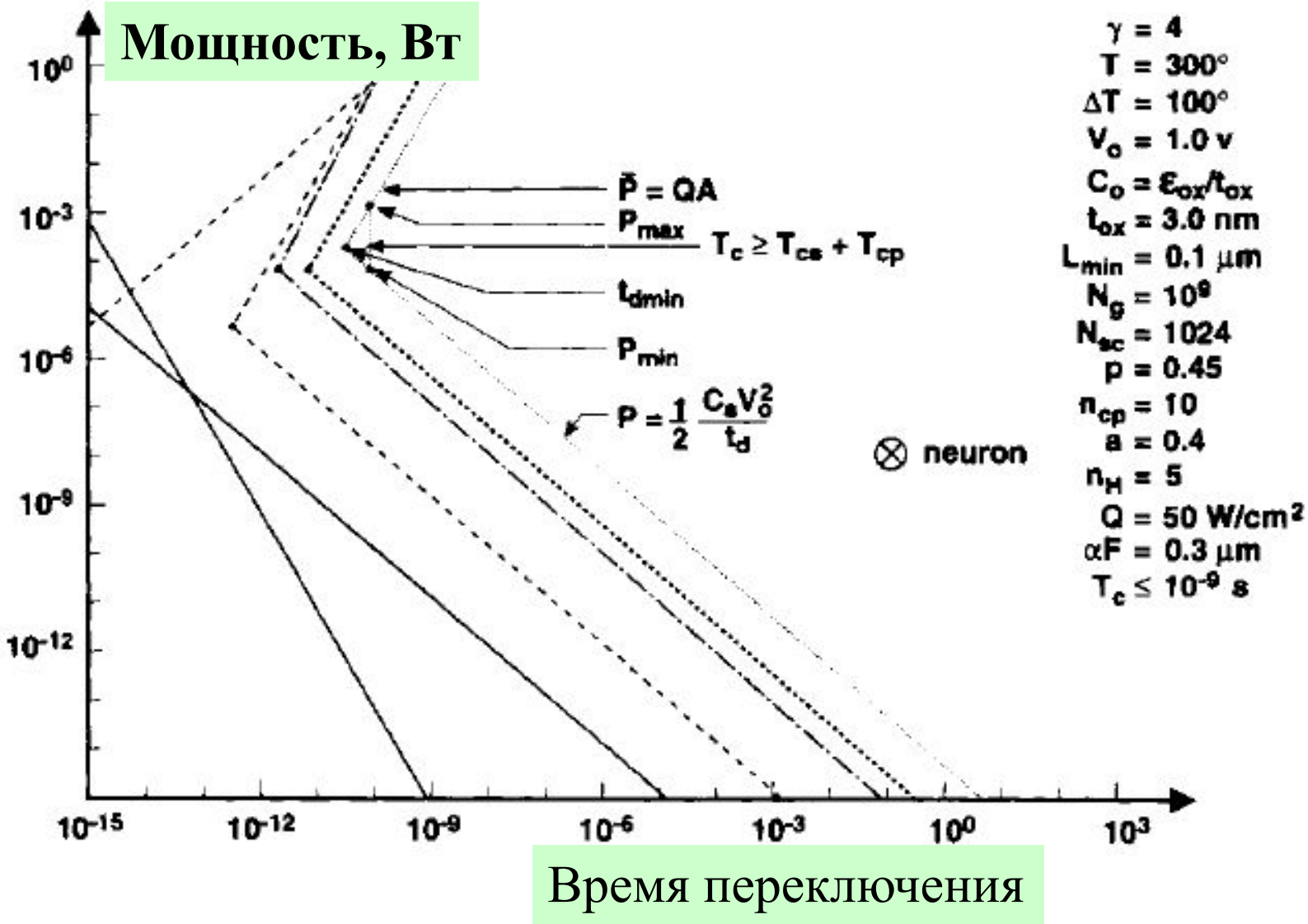
(Courtesy of AT&T)

Задержка сигнала при распространении по микрочипу вследствие перезарядки

$$\tau = RC \qquad C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$$

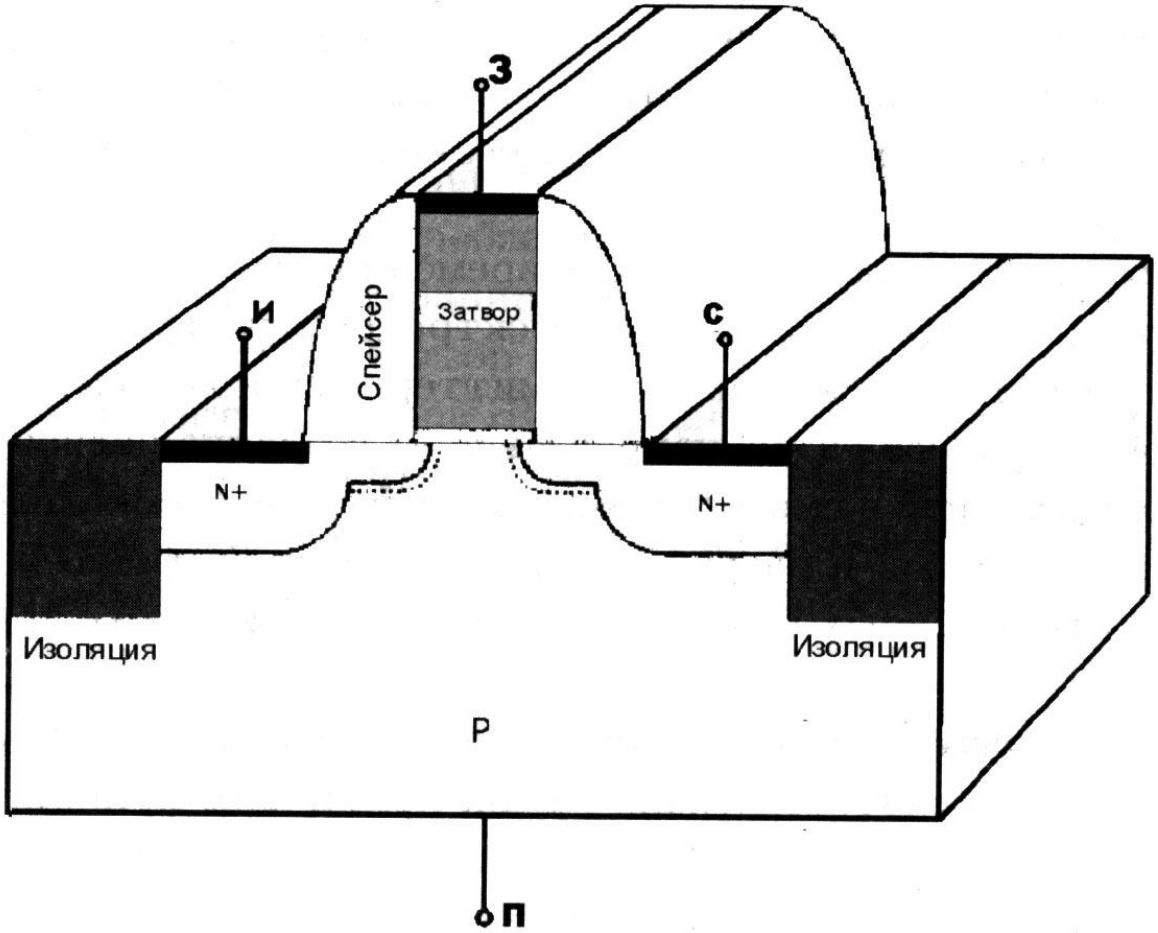


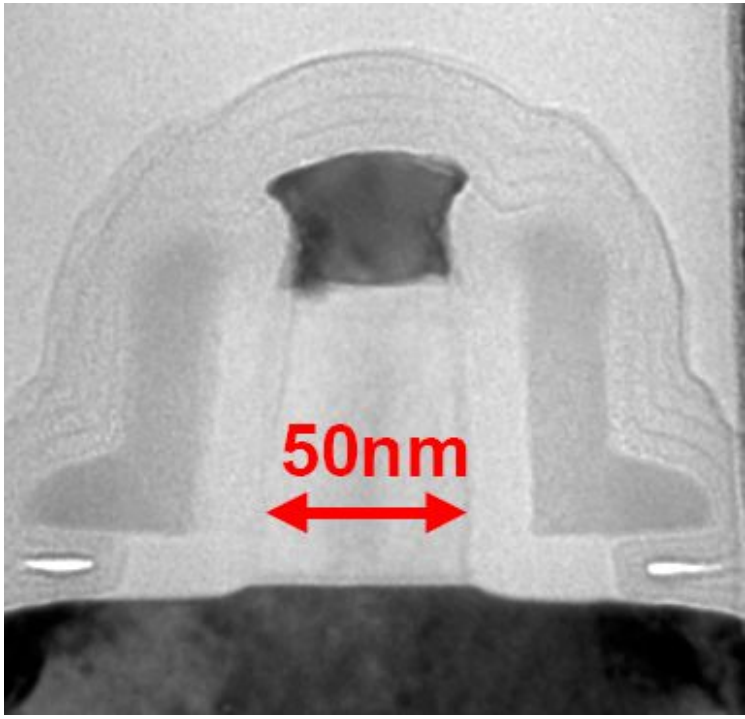
AMD claims 20nm transition signals the end of Moore's Law



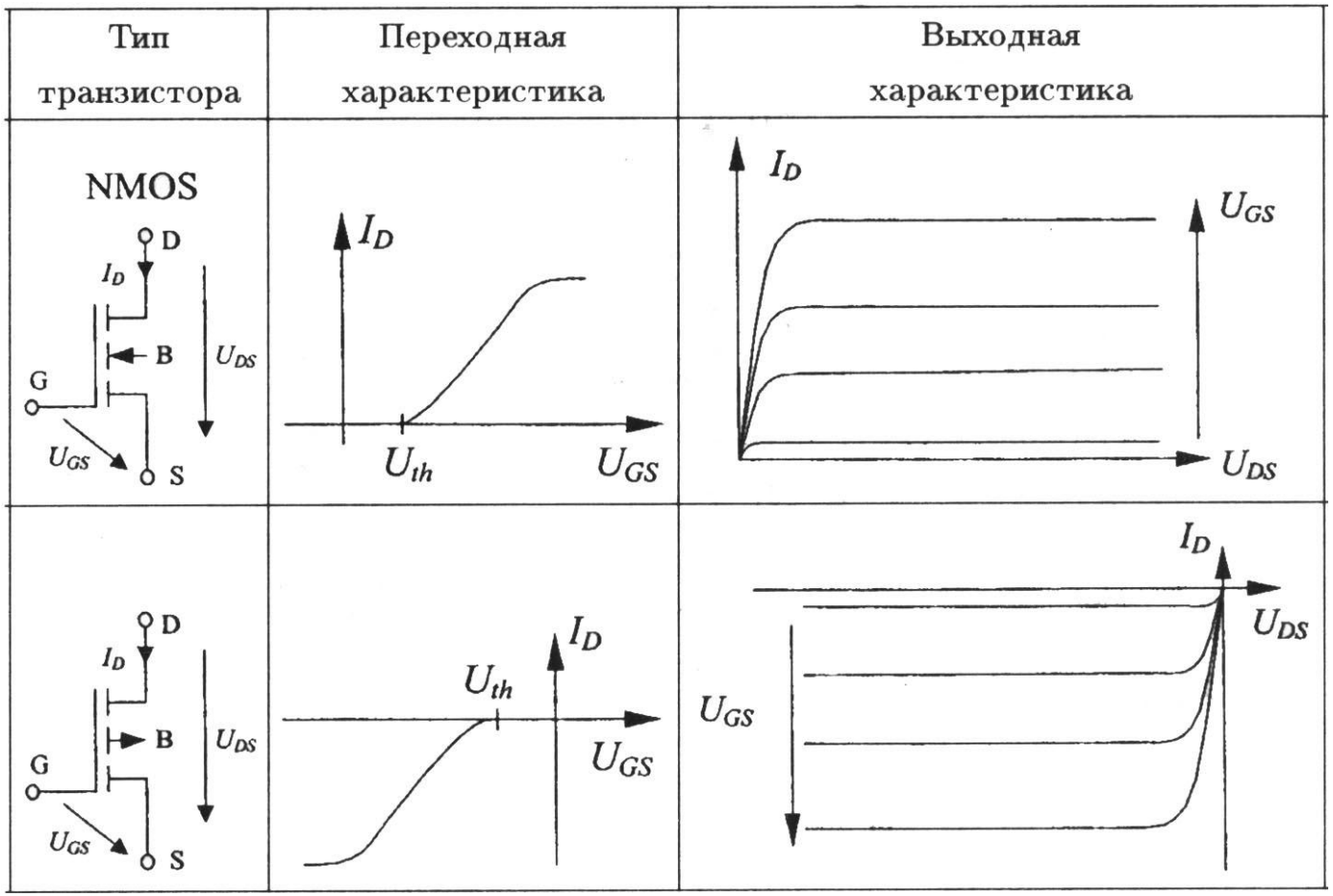
Верхние кривые отражают предел кремниевой технологии по отводу тепла, нижние кривые – по расходу энергии на перезарядку RC цепей в микрочипе

Типовая структура МОП-транзистора



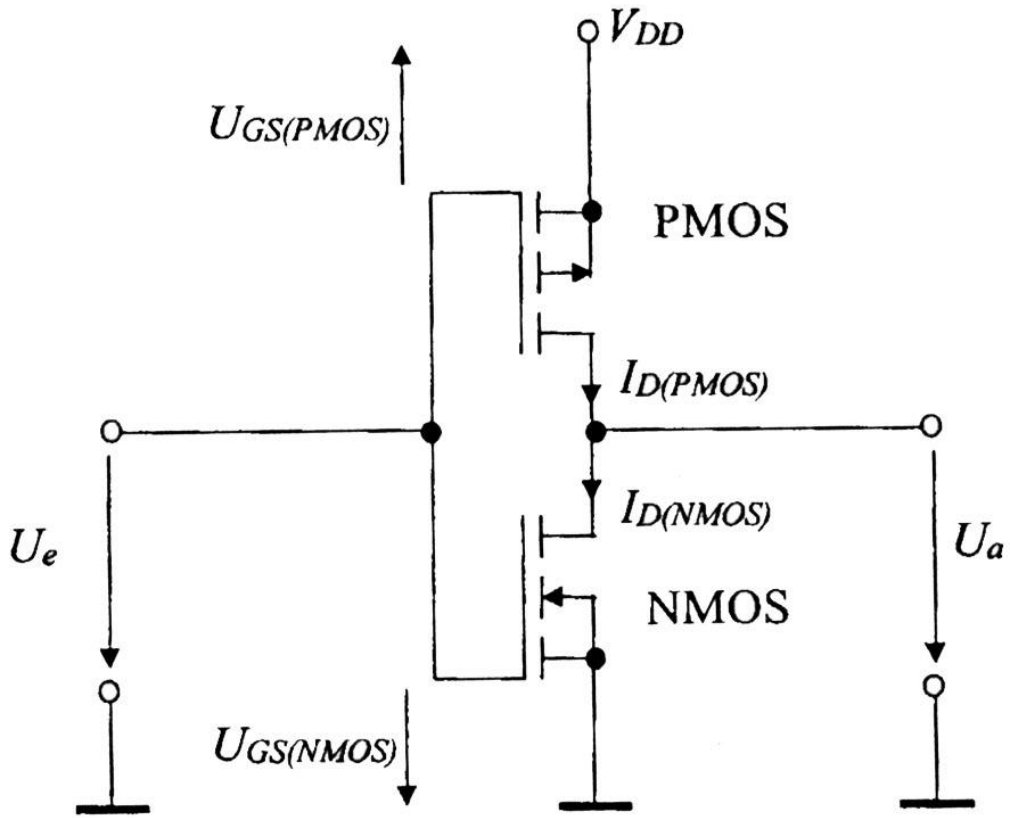


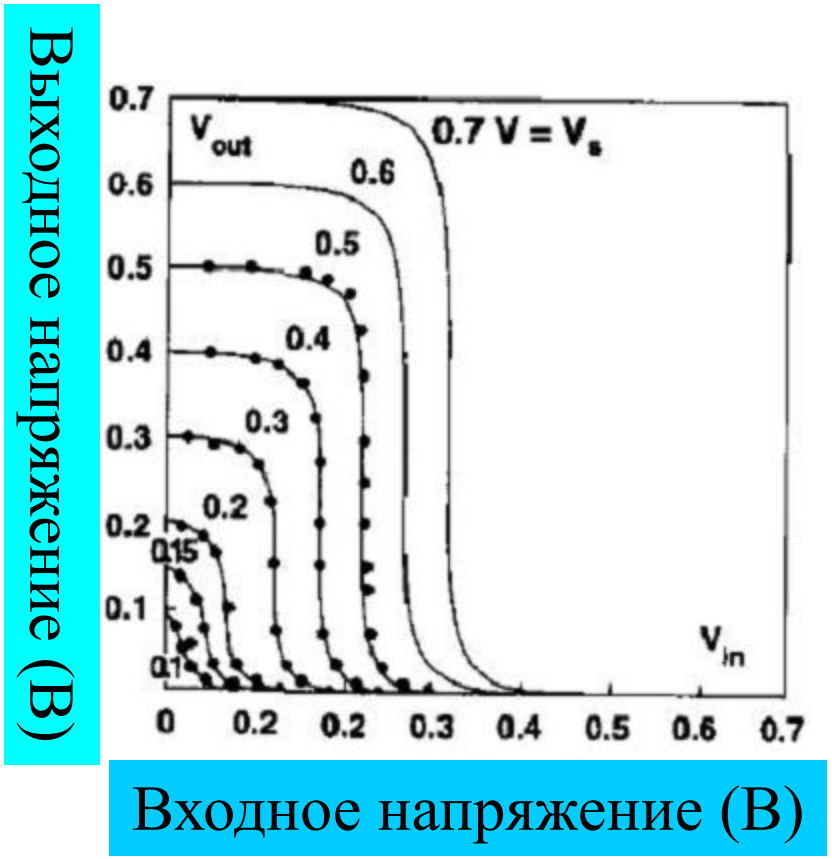
Характеристики МОП транзисторов



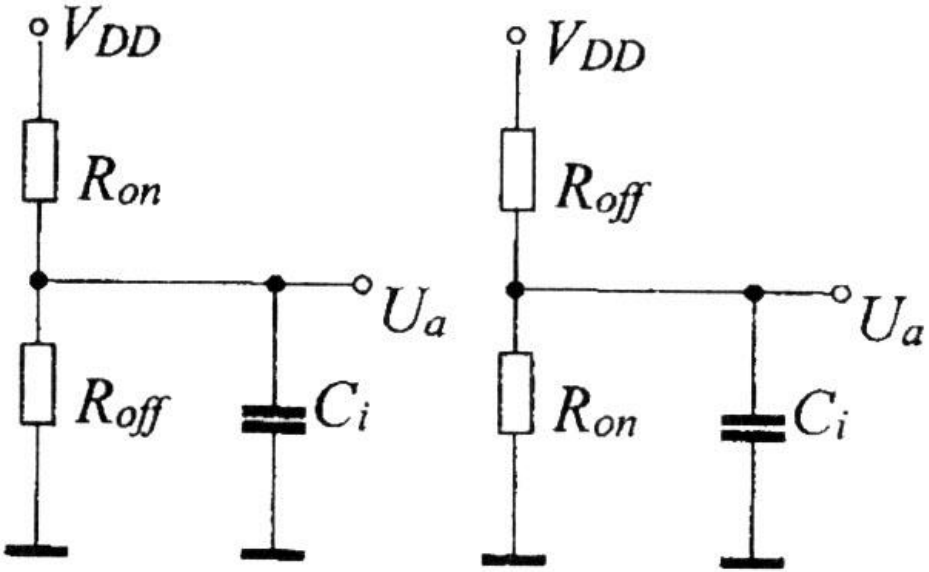
G – gate, затвор (З), D – drain, сток (С), S – source, исток (И), B – body, корпус, I_D – ток стока, U_{th} – пороговое напряжение, при котором транзистор начинает проводить.

Структурная схема и передаточная характеристика КМОП инвертора





Рассеиваемая мощность и характеристики переключения транзисторных переключателей



модель КМОП инвертора

включение выключение

Изменение выходного напряжения при включении и выключении

$$U_a = V_{DD}\left(1 - e^{-t/R_{on}C_i}\right)$$

$$U_a = V_{DD}e^{-t/R_nC_i}$$

Постоянная времени

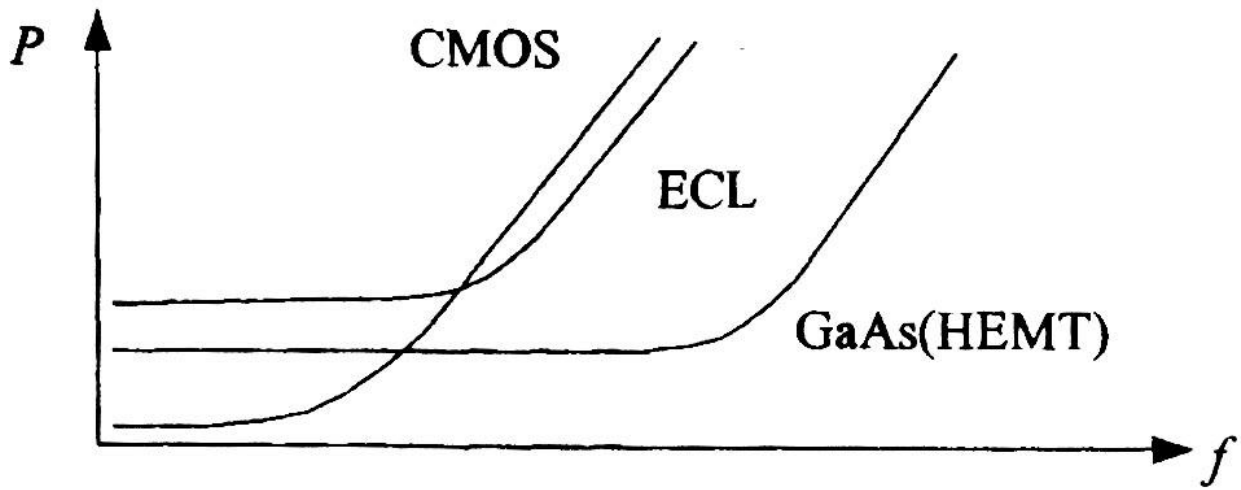
$$t_S \approx R_{on}C_i$$

$$P = V_{DD}^2\left(\frac{1}{R_{on} + R_{off}} + fC_i\right)$$

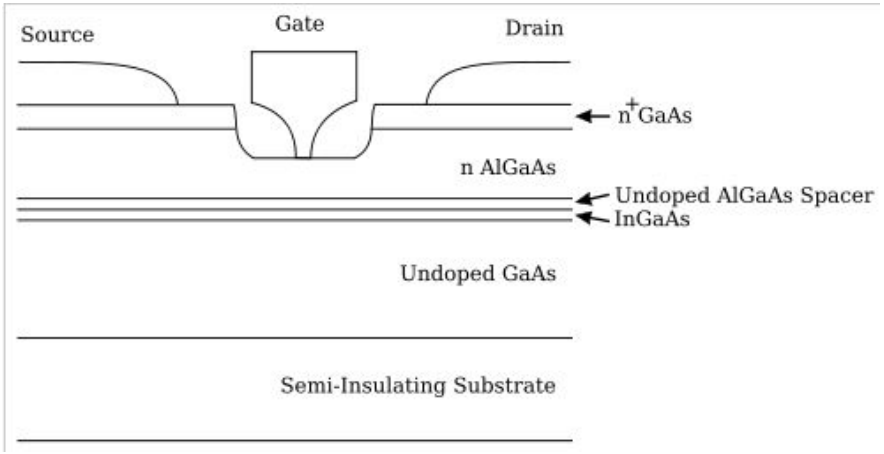
ВЫВОДЫ

- Для быстродействующих схем необходимы низкие сопротивления во включенном состоянии и, следовательно, транзисторы с большой шириной затвора (если применяются МОП).
- Быстродействующие схемы требуют, чтобы емкости проводников были малы, поэтому в быстродействующих схемах к выходу можно подключать только малое число вентилей.
- При увеличении скорости переключения возрастает мощность потерь.
- У быстродействующих и высокоинтегрированных схем напряжение питания должно быть уменьшено.

Схематическая зависимость мощности от частоты переключений



ECL – эмитерно-связанная логика (emitter-coupled logic)
GaAs (HEMT) - транзисторы с высокой подвижностью электронов (high-electron-mobility transistor HEMT)



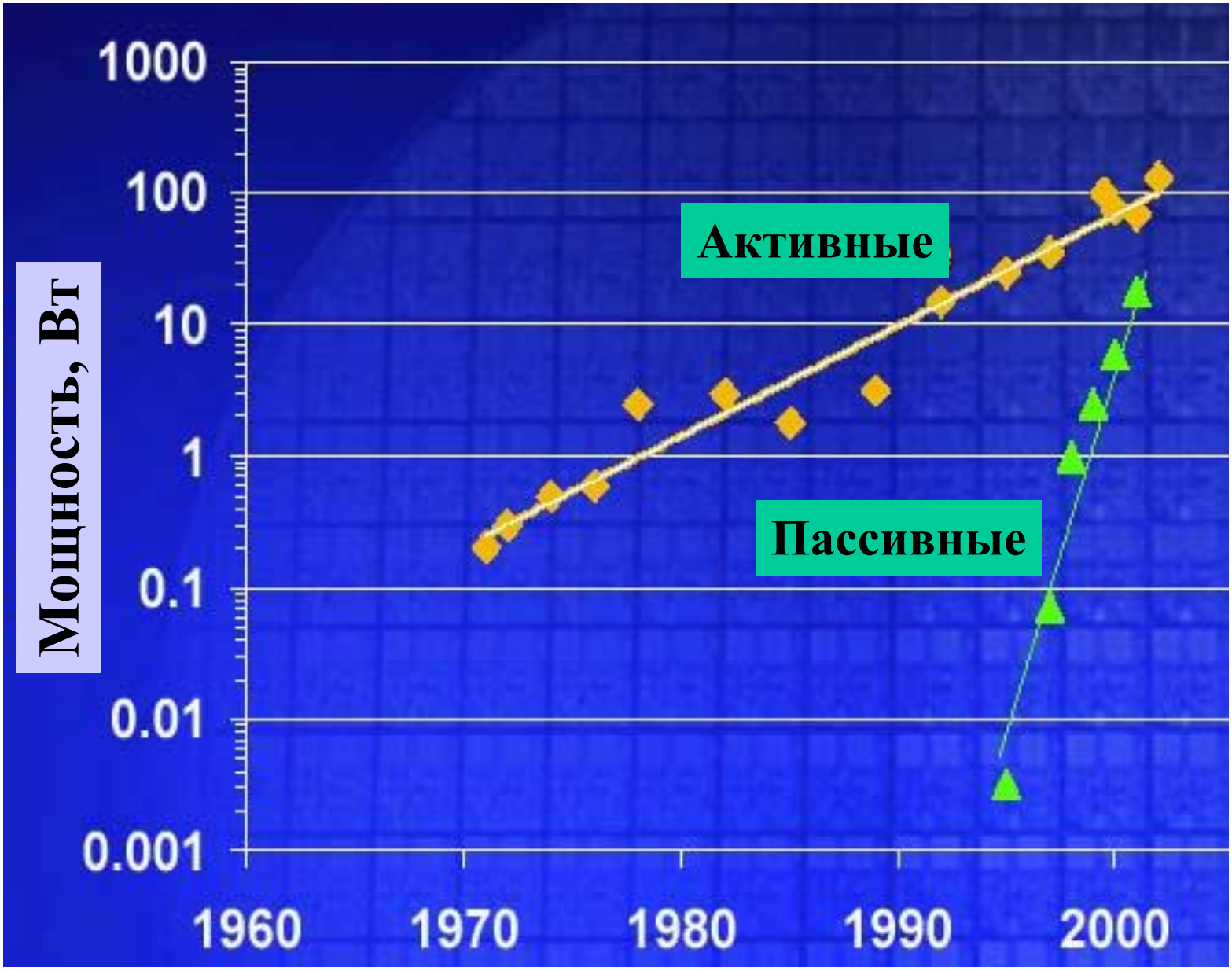
Технологические параметры КМОП технологии

Проектные нормы, нм	250	180	130	100	70	22
Толщина окисла, нм	4-5	3-4	2-3	1,5-2	< 1,5	
Глубина *p-n* переходов, нм	50 - 100	36- 72	26 - 52	20 -40	15 - 30	10
Ток утечки, нА/мкм	1	1	3	3	10	30
Мощность/кристалл, Вт	70	93	121	120		300

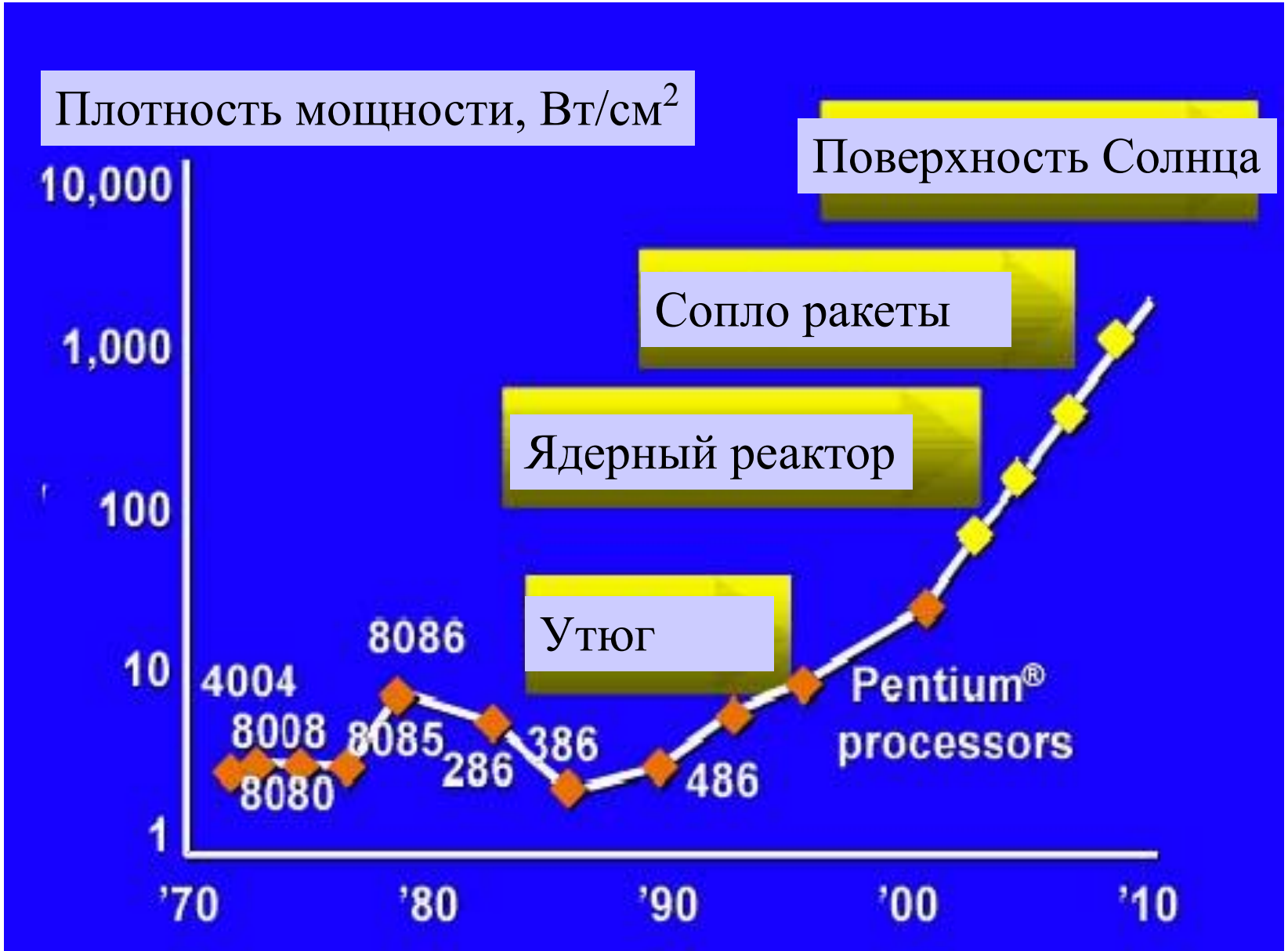
Электронные компоненты являются «неидеальными» и их шунтируют паразитные сопротивления, обуславливающие утечки тока. Паразитные сопротивления включаются и последовательно с «идеальными» элементами. Сопротивления включены последовательно и/или параллельно конденсаторам, диодам и, конечно, переключателям (транзисторам).

Физические механизмы, обуславливающие эти утечки тока, определяются туннельным эффектом, термоэлектрической эмиссией, генерацией носителей в области пространственного заряда и другими физическими эффектами. Паразитные сопротивления имеют большую величину (порядка 10^9 – 10^{12} Ом), но, тем не менее, они в значительной мере определяют энергетику современных электронных цифровых устройств обработки информации. Действительно, при напряжении на ядре микропроцессора 1 В ток утечки одной ячейки составляет величину 10^{-9} ... 10^{-12} А, но при общем числе элементов на микросхеме $N = 10^9$, ток может достигать и превышать 1 А. Уменьшение характерного размера микросхем приводит только к увеличению пассивных потерь, причем их рост происходит быстрее активных.

Рост потерь в полупроводниковых процессорах



Проблема отвода тепла от микрочипа



Основные ограничения:

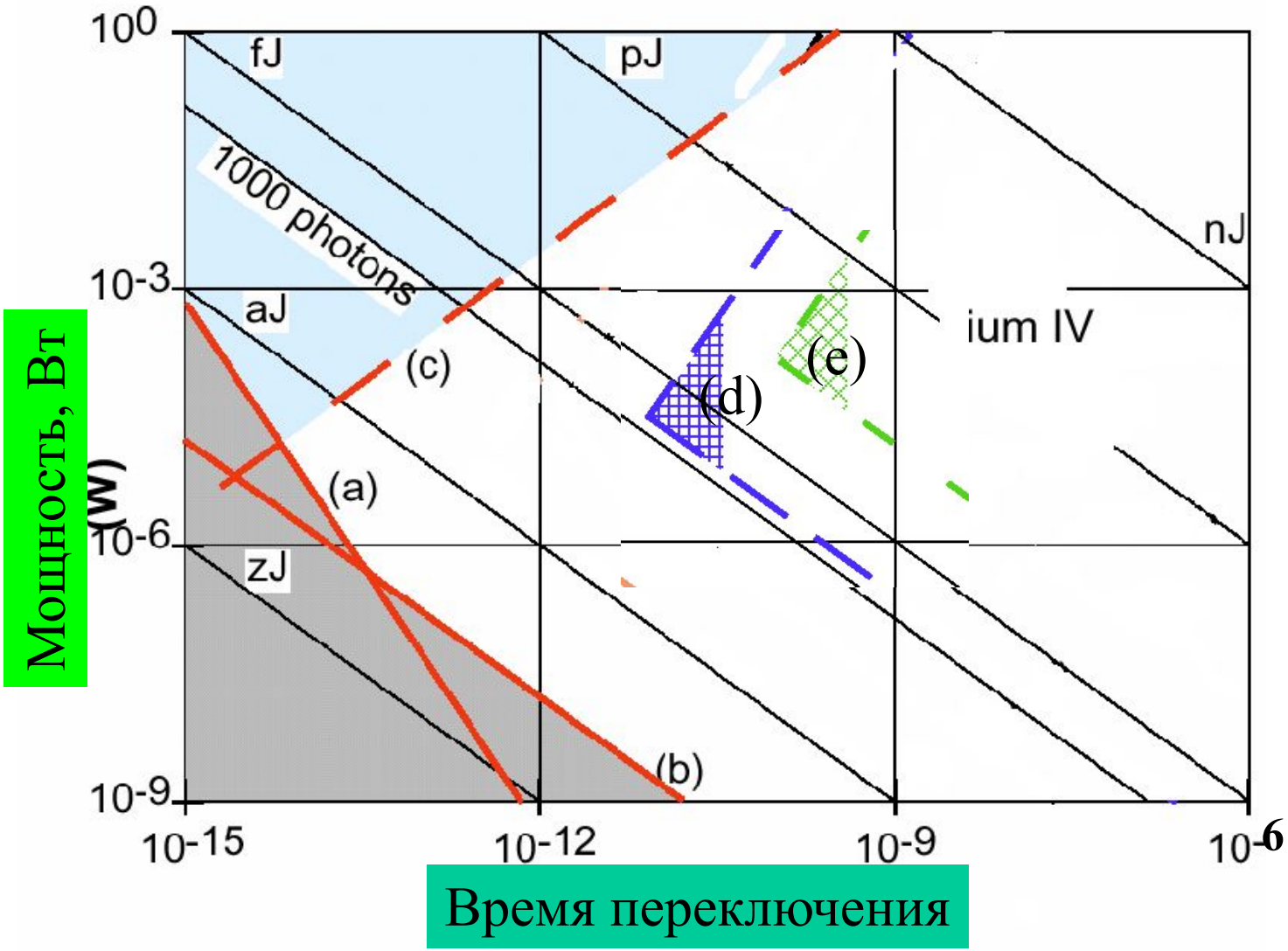
С ростом числа элементов увеличивается электрическая емкость системы и препятствует увеличению тактовой частоты

Увеличение числа элементов приводит к росту числа межсоединений и, соответственно, к увеличению времени задержки прохода сигнала между макроструктурами процессора

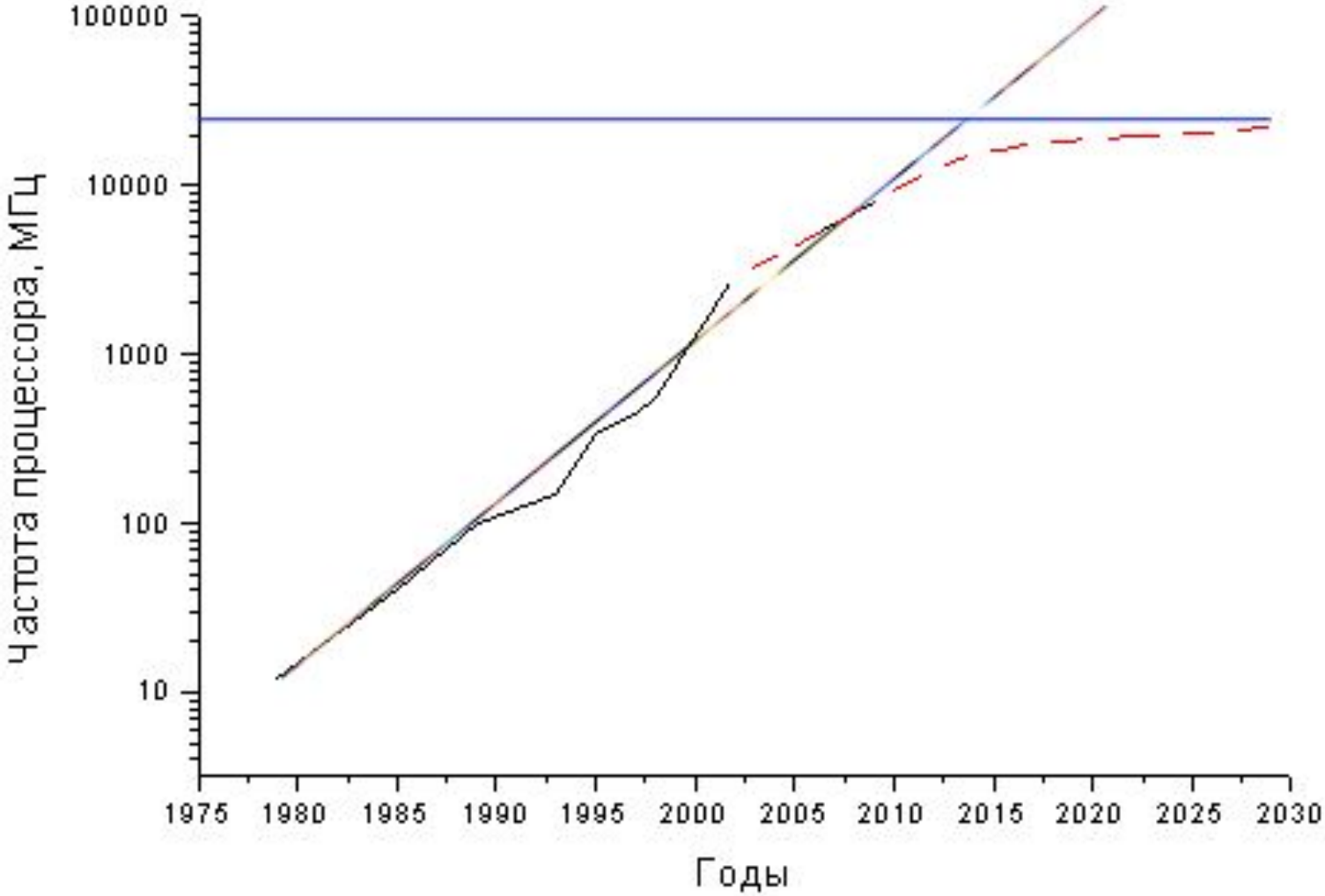
С ростом тактовой частоты растет сопротивление, что приводит к нагреву систему и проблеме отвода тепла (при охлаждении солями тяжелых металлов – 10^3 Вт/см^2)

Оценки показывают, что максимум тактовой частоты при кремниевой технологии – 30…40 ГГц

Пределы современной компьютерной техники.



Вероятный ход зависимости закона Мура для тактовой частоты



Контрольные вопросы

1.Определение оптоинформатики
2. Основные даты компьютерной техники
3. Поколения компьютерной техники
4. Прогноз Г.Мура
5. Термодинамический предел электронной ячейки.
6. Квантовый предел электронной ячейки.
7. Проблема отвода тепла.
8. График фундаментальных пределов
9. Влияние емкостных характеристик
10. Влияние задержки сигналов.
11. Пределы кремниевой технологии
12. Вероятный ход зависимости Г.Мура