

Физические основы микроэлектроники

16 лекций, семинары.

Экзамен

Цель – объяснить физические принципы работы основных элементов современной микроэлектроники и показать физический предел их основных характеристик

Лекции – Володин Владимир Алексеевич,

раб. тел. 333-24-70, volodin@isp.nsc.ru,

v.volodin@g.nsu.ru

Семинары – Блошкин Алексей Александрович

**Работа на семинарах + письменный экзамен для
положительной оценки на экзамене!**

Автоматы - задачи.

- 1) Введение в курс**
- 2) Структура, методы роста и исследования полупроводников.**
- 3) Динамика кристаллической решётки. Фононы.**
- 4) Элементы зонной теории твердого тела.**
- 5) Статистика электронов и дырок в полупроводниках.**
- 6) Примеси в полупроводниках.**
- 7) Кинетические явления в полупроводниках.**
- 8) Термоэлектрические и термомагнитные явления. Диффузионный ток.**

9) Поверхность полупроводника, поверхностные состояния. Область пространственного заряда ОПЗ. Гетерограница, гетероструктуры.

10) Контакт металл-полупроводник. Диод Шоттки.

11) P-n переход.

**12) Приборное применение р-п переходов.
Биполярный транзистор.**

13) Эффект поля. МДП-транзистор.

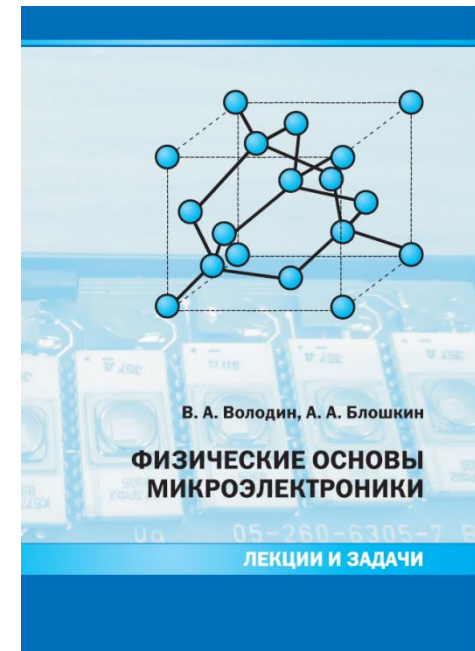
14) Приборы на основе МДП-структур.

15) Элементы планарной технологии.

**16) Проблемы и предельные параметры планарной
технологии. Нанoeлектроника.**

Литература — лекции изданы в 2009 году,
дополнены и переизданы в 2019,
планируется переиздание в 2025.

Дополнительная литература
(желательно).



Список дополнительной литературы:

- 1. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990.**
- 2. Гинзбург И. Ф. Введение в физику твердого тела: Ч. 1–3. Новосибирск: НГУ, 1998.**
- 3. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. М.: Мир, 1984.**
- 4. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.**
- 5. Кравченко А. Ф. Физические основы функциональной электроники. Новосибирск: НГУ, 2000.**
- 6. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: в 2 кн. М.: Техносфера, 2002.**
- 7. Левинштейн М. Е., Симин Г. С. Барьеры: Биб-ка Квант. Вып. 65. М.: Наука, 1987.**
- 8. Левинштейн М. Е., Симин Г. С. Знакомство с полупроводниками: Биб-ка Квант. Вып. 33, М.: Наука, 1984.**
- 9. Питер Ю., Мануэль Кардона. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2002.**
- 10. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М.: Высшая школа, 1991.**
- 11. Сугано Т, Икома Т, Такэиси Е. Введение в микроэлектронику. М.: Мир, 1988.**
- 12. Шалимова К. В. Физика полупроводников. М.: Энергия, 1976.**

**Лекция 1: Введение в курс.
Полупроводники в современной
электронике и оптоэлектронике.
Исторический обзор и
перспективы
микроэлектроники.**

Вакуумная (ламповая) электроника

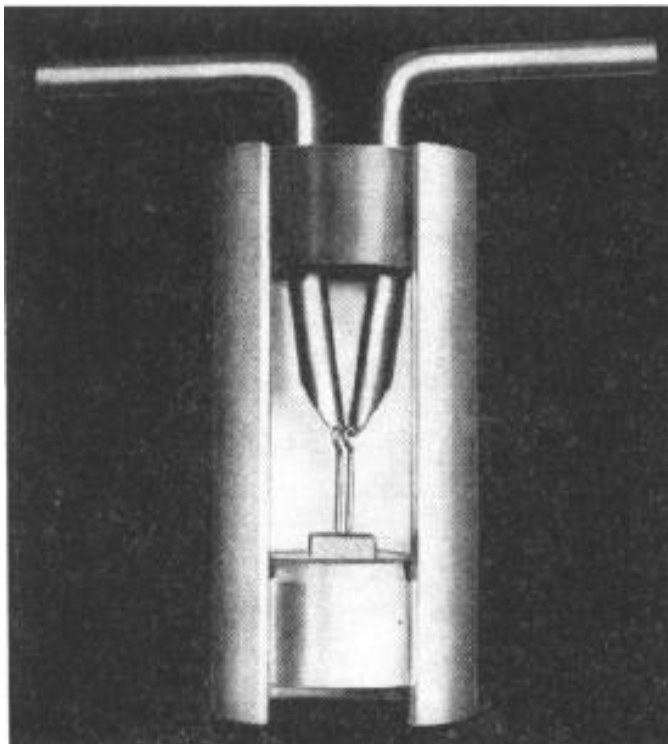
1906 год – Ли де Форест (США) подаёт заявку на изобретение лампового триода.

Нобелевская премия по физике, 1928 г.

Оуэн Ричардсон получил премию за работы по термионным исследованиям, и особенно за открытие закона, носящего его имя. Закон Ричардсона утверждает, что скорость испускания электронов быстро возрастает с увеличением температуры поверхности. Ричардсон предложил новый термин термионика (учение о термоэлектронных процессах) для обозначения эффекта испускания электрических зарядов раскаленными телами.

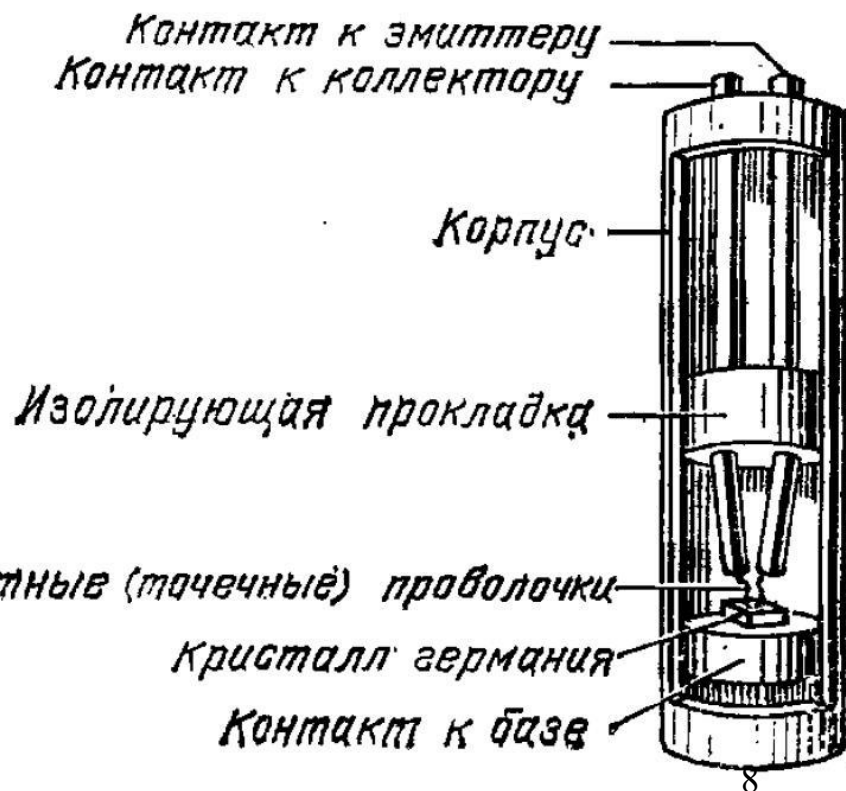
Почти 50 лет – господство вакуумной электроники.

С чего всё начиналось?

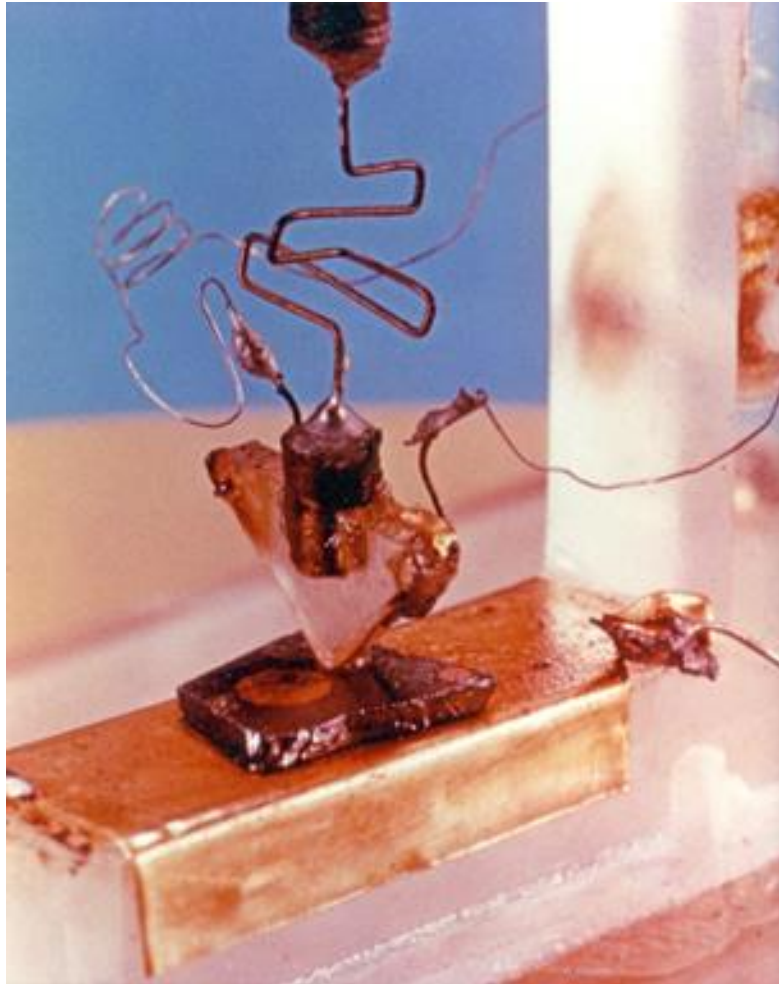


Изображение первого биполярного транзистора. Из работы J.Bardeen and W.H.Brattain, “Physical principles involved in transistor action”, Physical Review v.75, p. 1208, 1949 год.

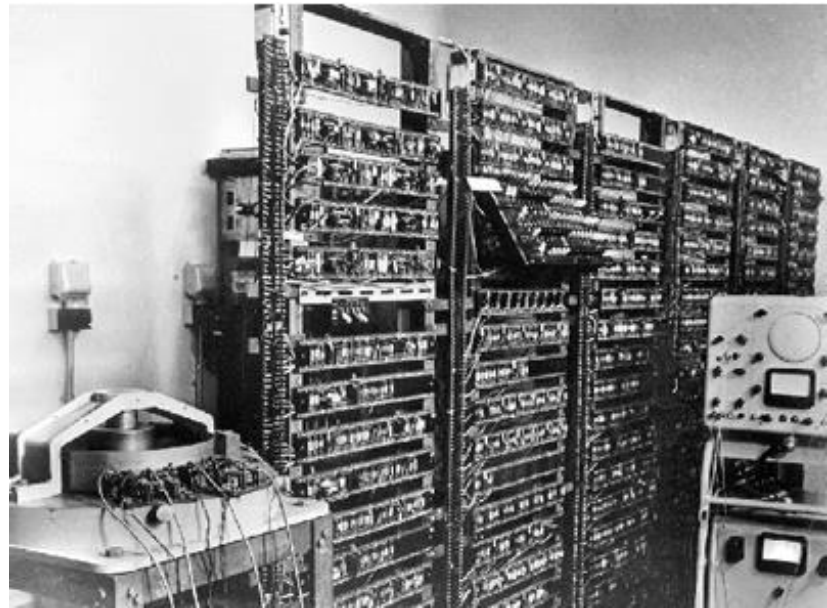
Размер был даже чуть больше чем у вакуумных ламп!



Начало эры транзисторов



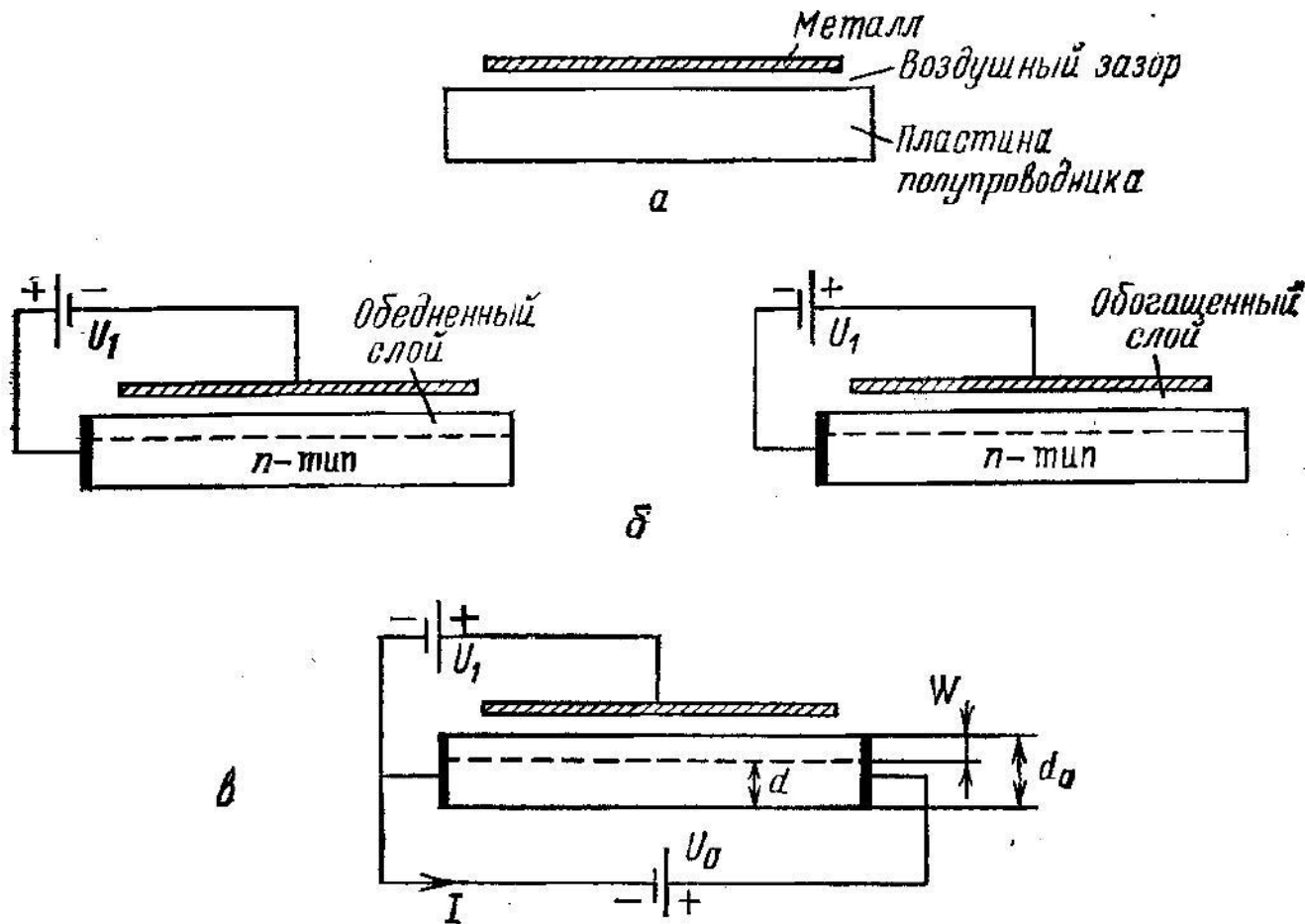
Транзистор с точечными контактами



Прототип транзисторного компьютера в университете Манчестера “Manchester TC” (1953 г.).

Когда высказана идея создания полевого транзистора?

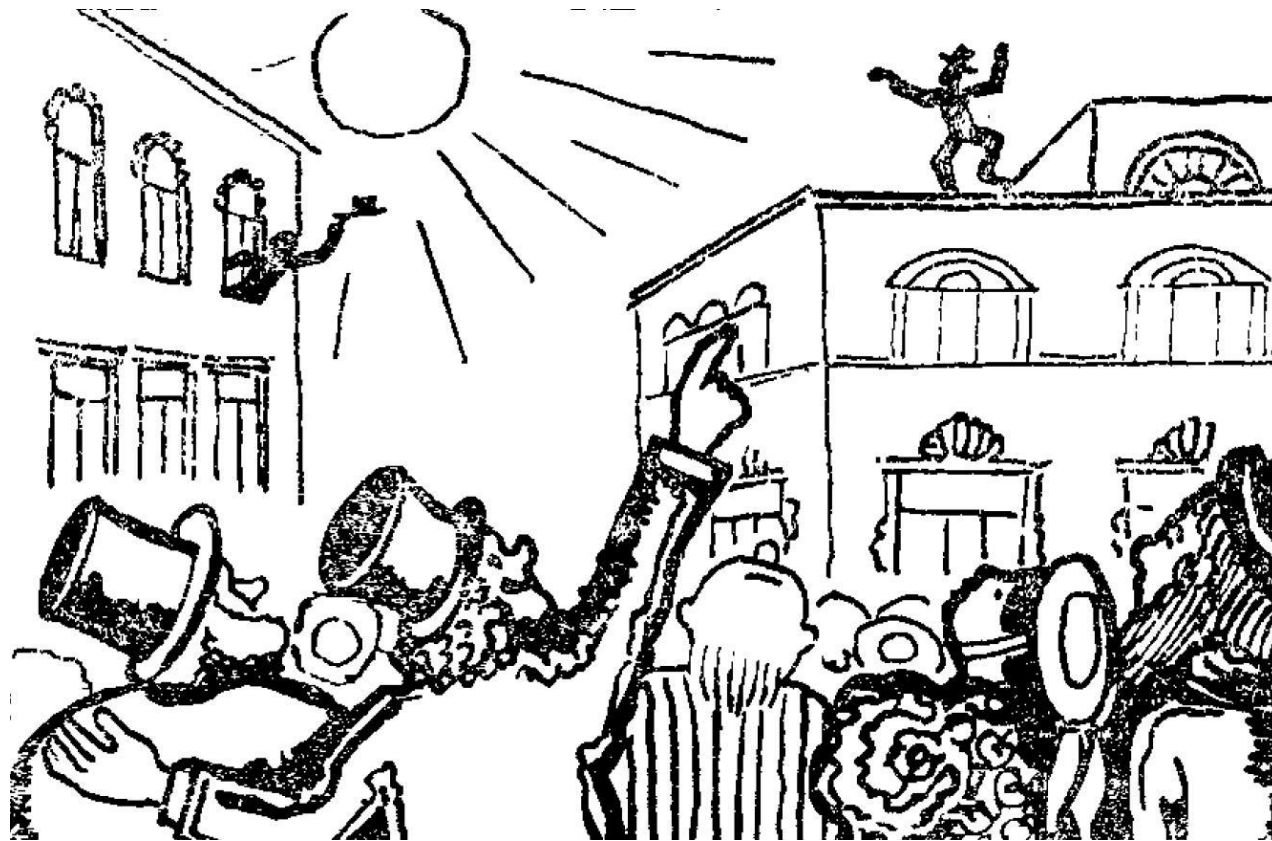
Идея полевого транзистора



1925 год,
Юлиус
Лилиенфельд

А когда был создан первый
оптоэлектронный прибор?

Первый сеанс оптоэлектронной связи



1873 год –
английские
инженеры Смит
и Мэй
сообщают о
необычном
свойстве *селена*
(открыт в 1817
году
Берцеллиусом)

Оптоэлектроника: 1875 год - Вернер фон Сименс изобрел фотометр.
Первый сеанс опто-электрической передачи информации с
помощью созданного в 1878 году Александром Беллом устройства
– фотофона.

Фотофон Белла, УФН (2013) т.183, с. 511

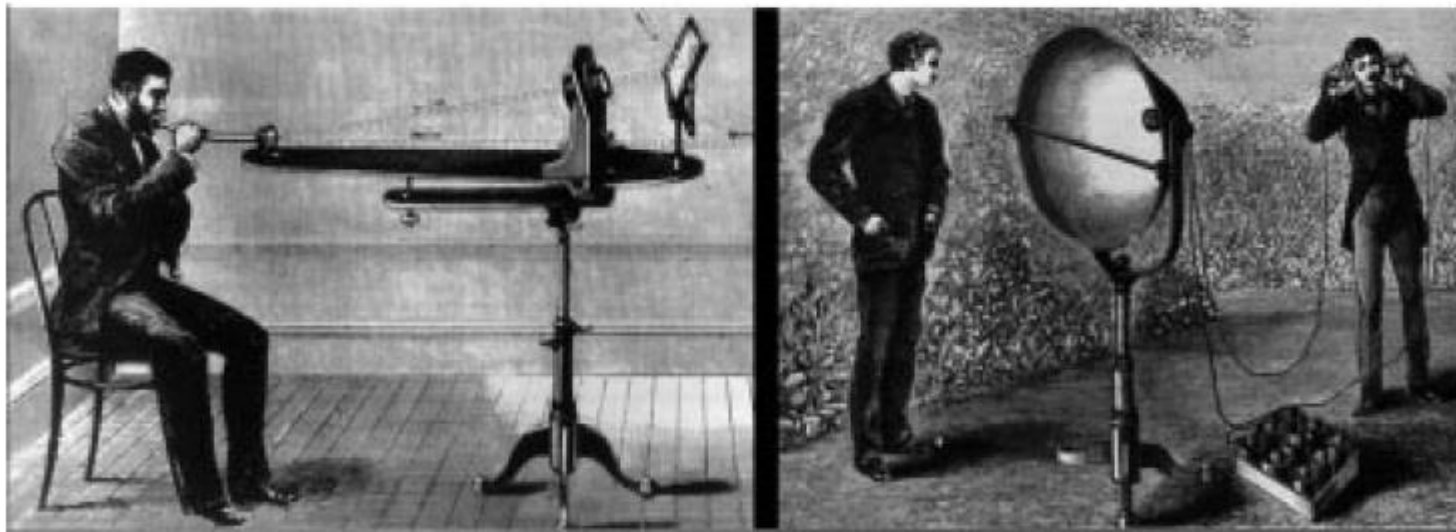
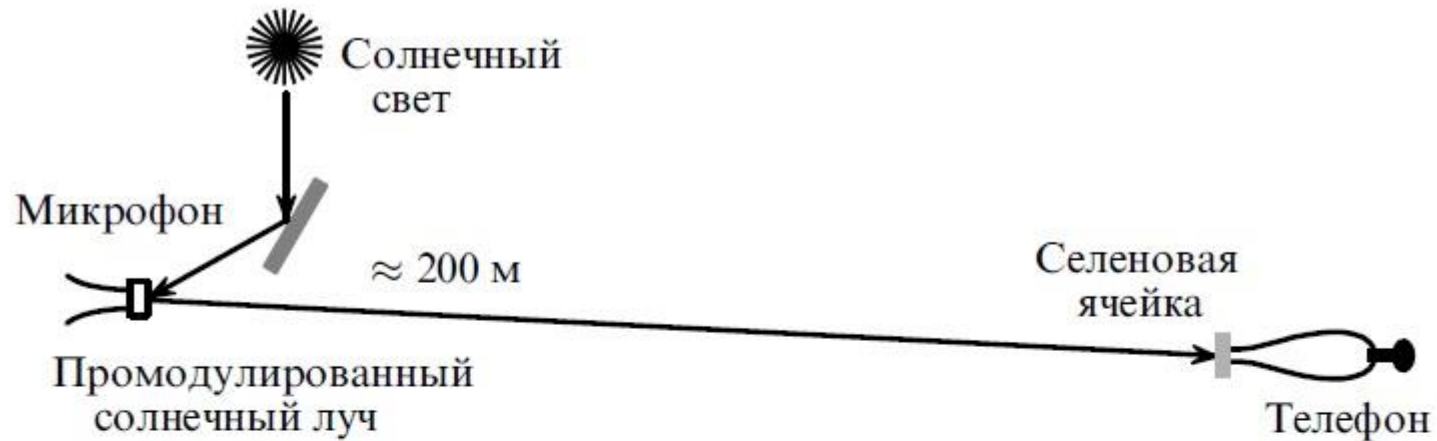


Рис. 1. Фотофон А. Белла.

Фундаментальная наука для развития электроники -

Нобелевские премии по физике за работы, определившие развитие микроэлектроники и оптоэлектроники.

- 1956 г. **У. Шокли, Дж. Бардин и У. Браттейн**
За исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта.
- 1973 г. **Л. Есаки и А. Жавер**
За экспериментальные открытия, связанные с туннелированием в полупроводниках и сверхпроводниках.
- 2000 г. **Ж. Алферов, Г. Кремер, Дж. Килби**
За основополагающие работы в области информационных и коммуникационных технологий.

2009 г.

Ч. Куэн

За революционные достижения, касающиеся передачи света в волокнах для нужд оптической связи.

У. Бойл, Д. Смит

За изобретение полупроводниковой схемы для регистрации изображений — ПЗС-сенсора.

2010 г.

А. Гейм, К. Новоселов

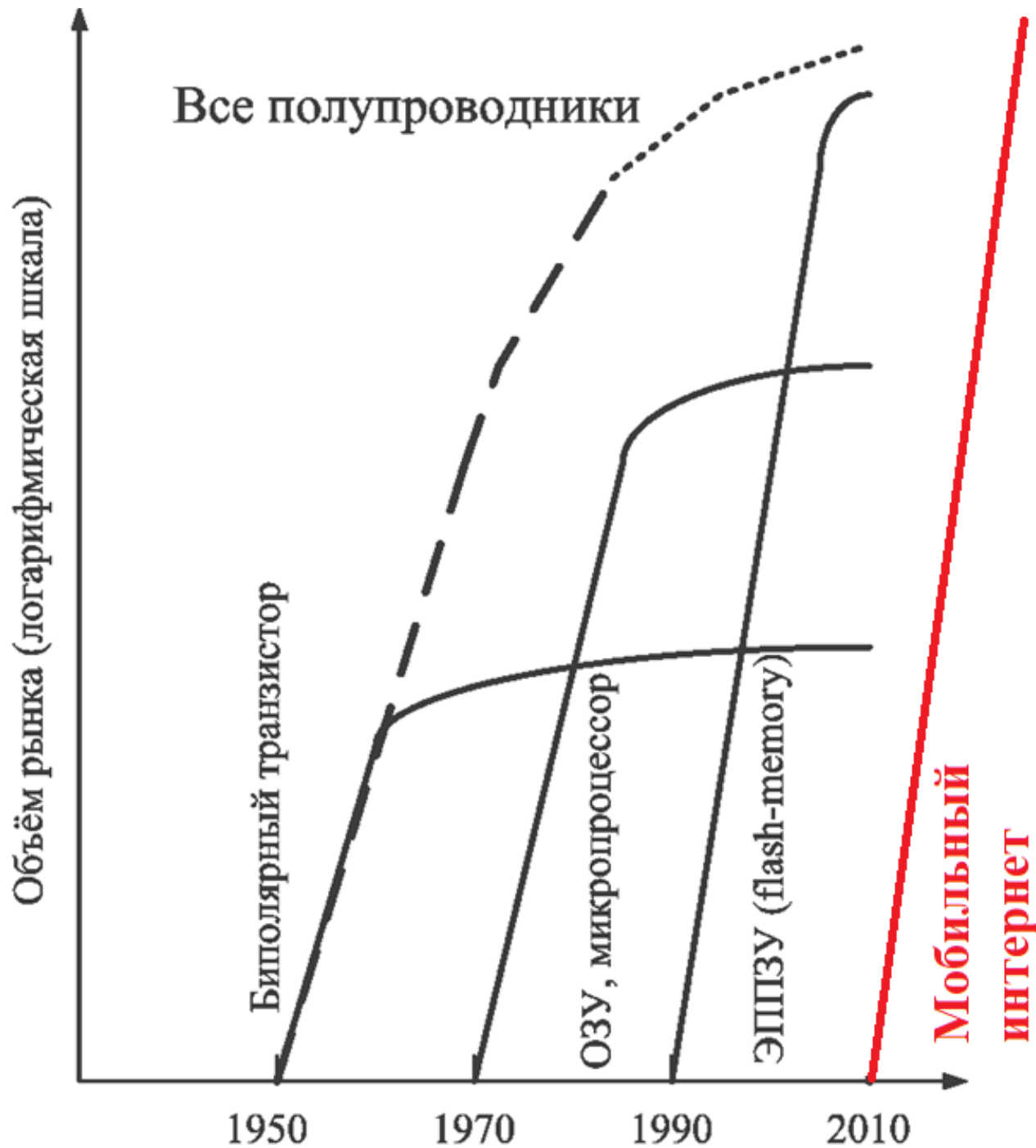
За передовые опыты с двумерным материалом графеном.

2014 г.

И. Акаса́ки, Х. Ама́но, С. Накамүра

За изобретение эффективных синих светодиодов, приведших к появлению ярких и энергосберегающих источников белого света.

Лауреатами Нобелевской премии по химии 2023 года стали Алексей Екимов, Луис Брюс и Мунги Бавенди, открывшие и синтезировавшие нанокристаллы — так называемые квантовые точки.



**Рынок
микроэлектроники
– какие драйверы в
двадцатых годах?**

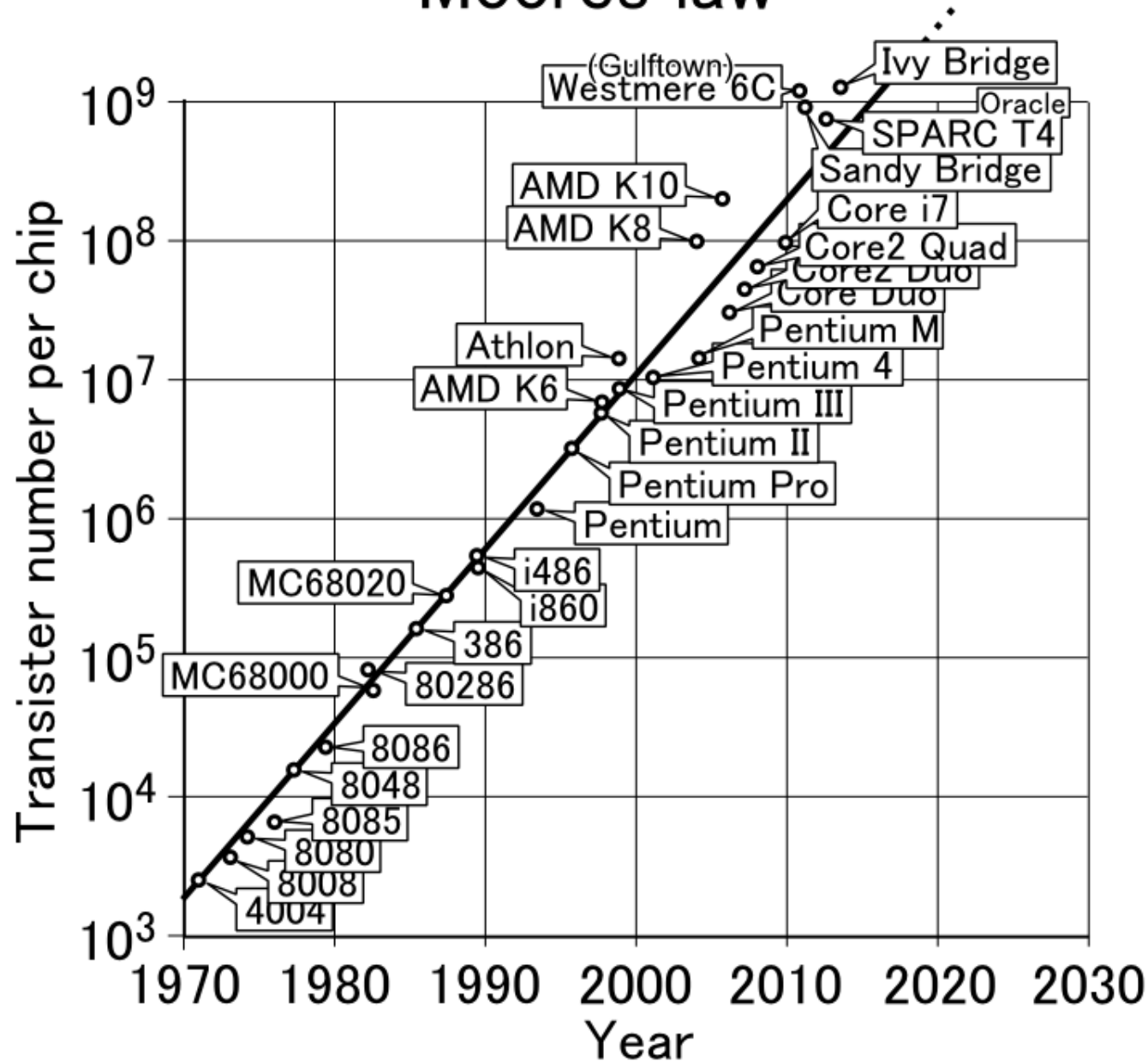
Интернет вещей?

Big data?

**Требования - новая
универсальная
память.**

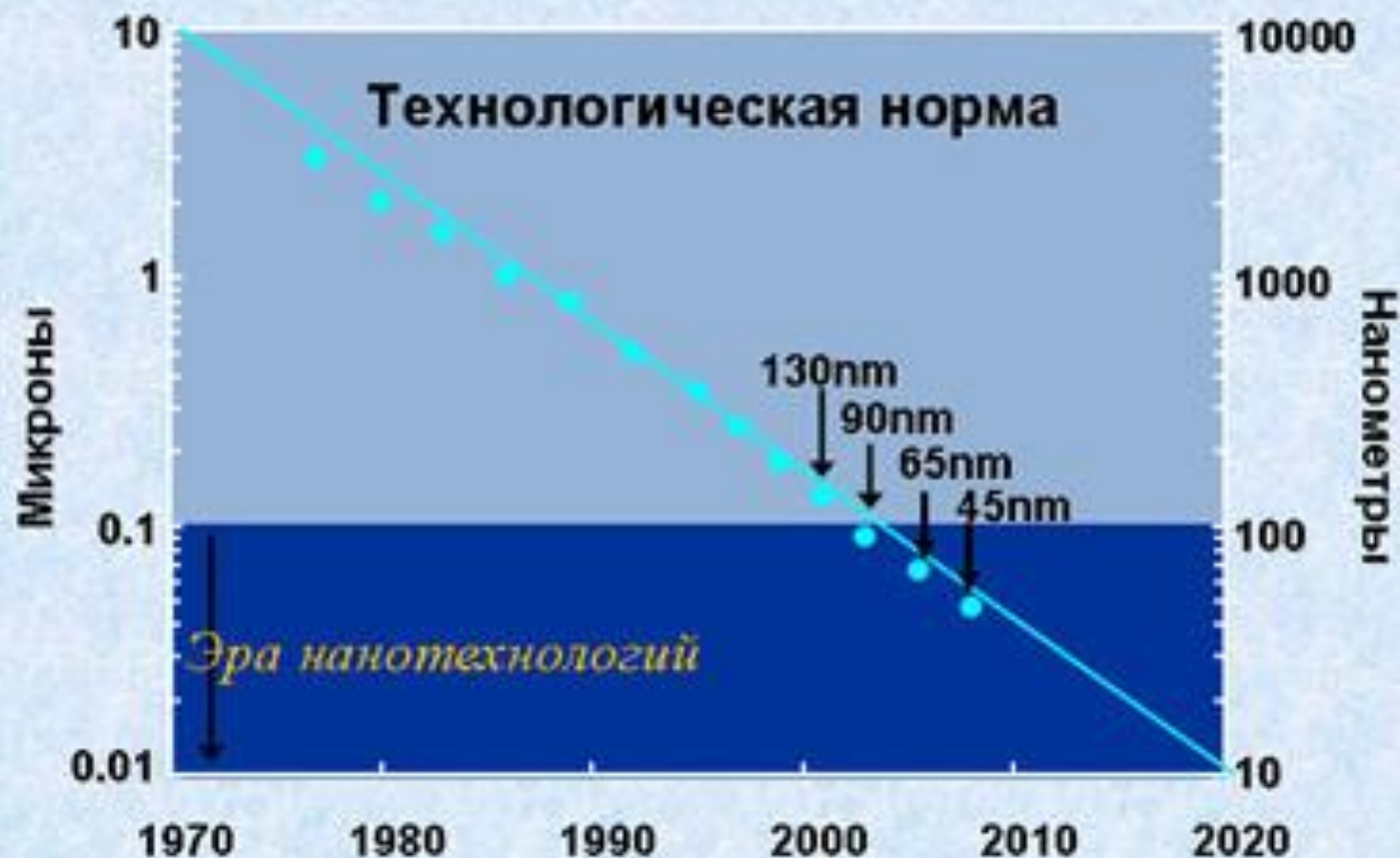
«Закон Мура»

Moore's law



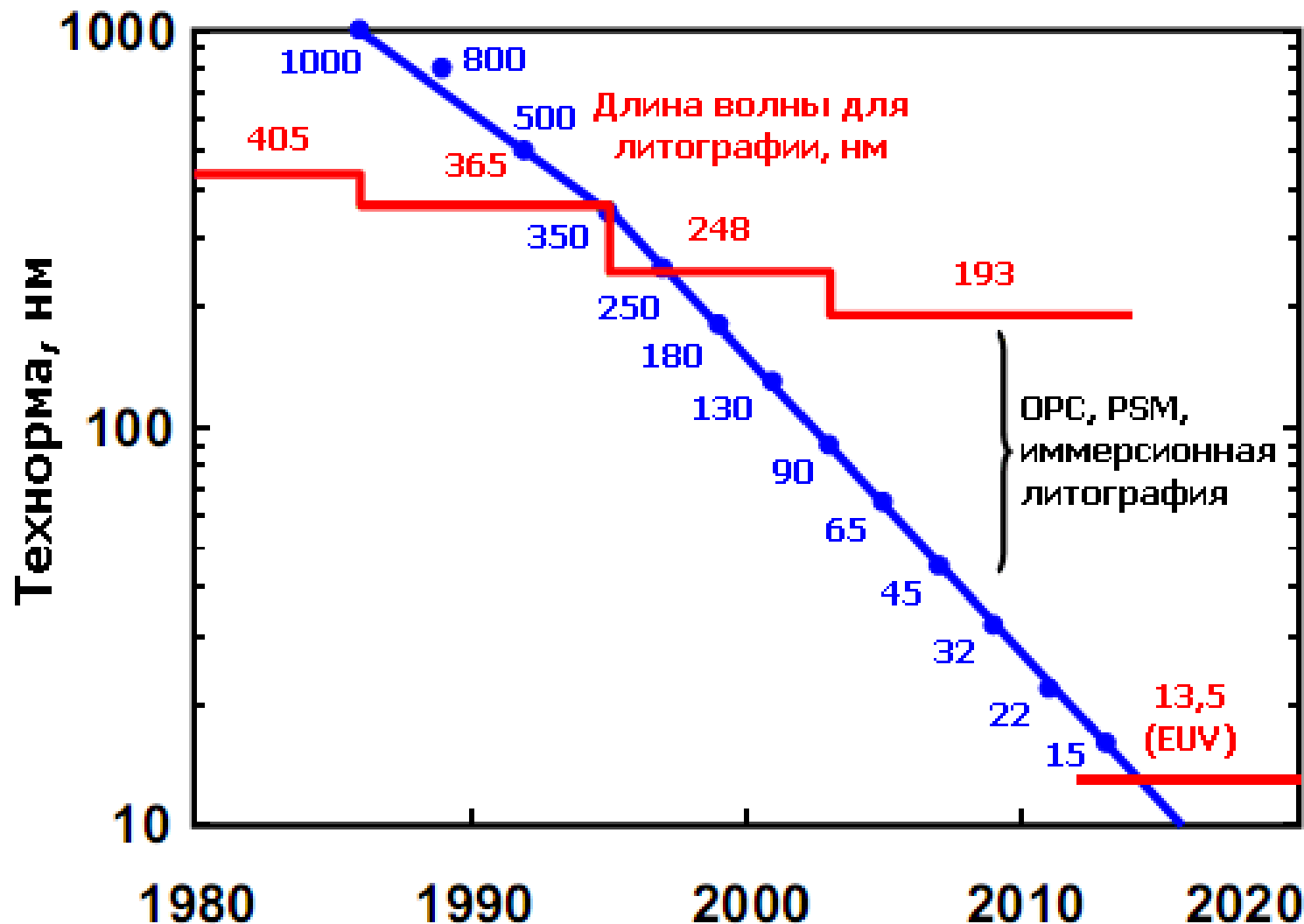
Миниатюризация элементов

Динамика уменьшения топологических размеров



Technology node – проектная норма

Физические пределы

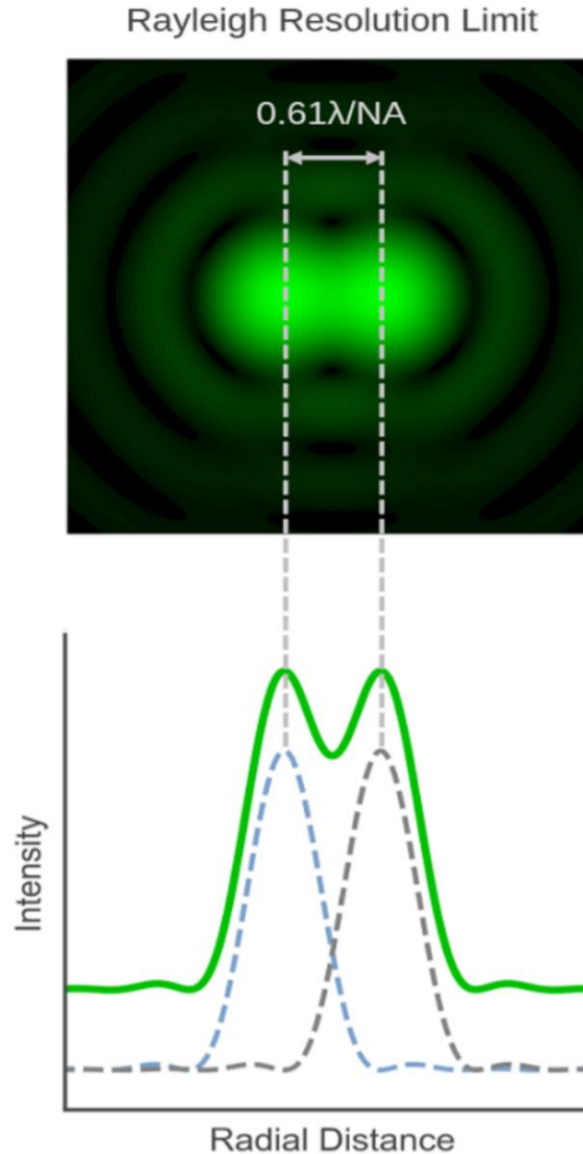
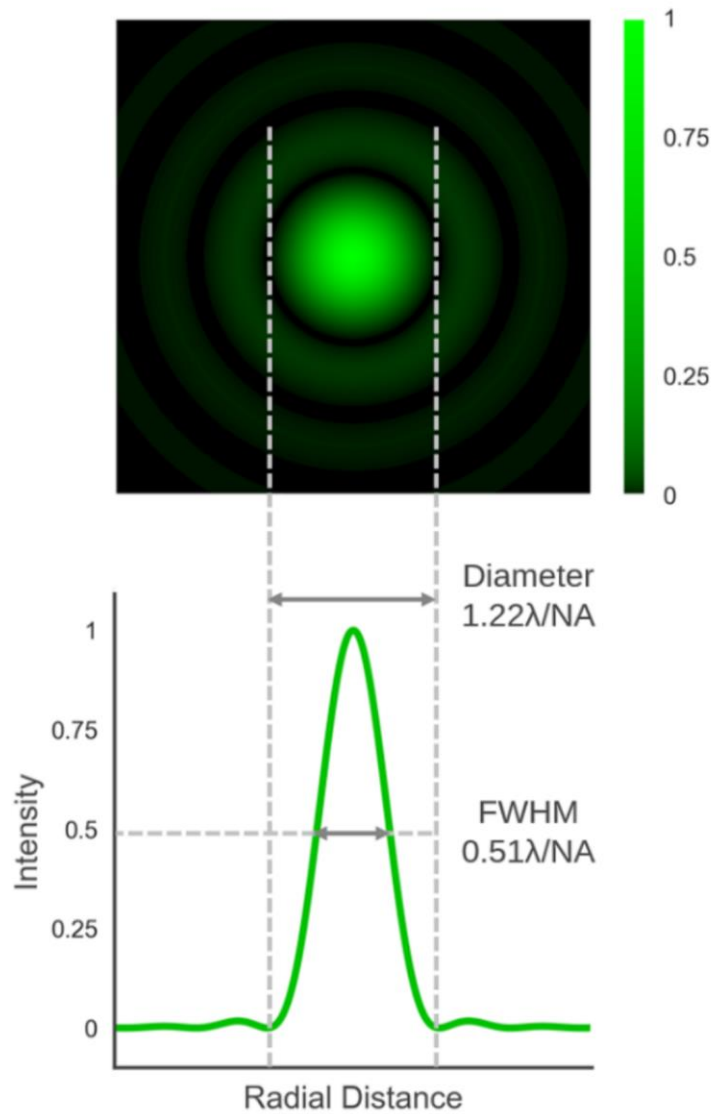


Закон Мура поддерживается технологией 3D –

<https://3dnews.ru/1071797/nanometri-v-mikroelektronike> - технологическая норма

теперь эффективная – 4 слоя значит она в 2 раза меньше ...

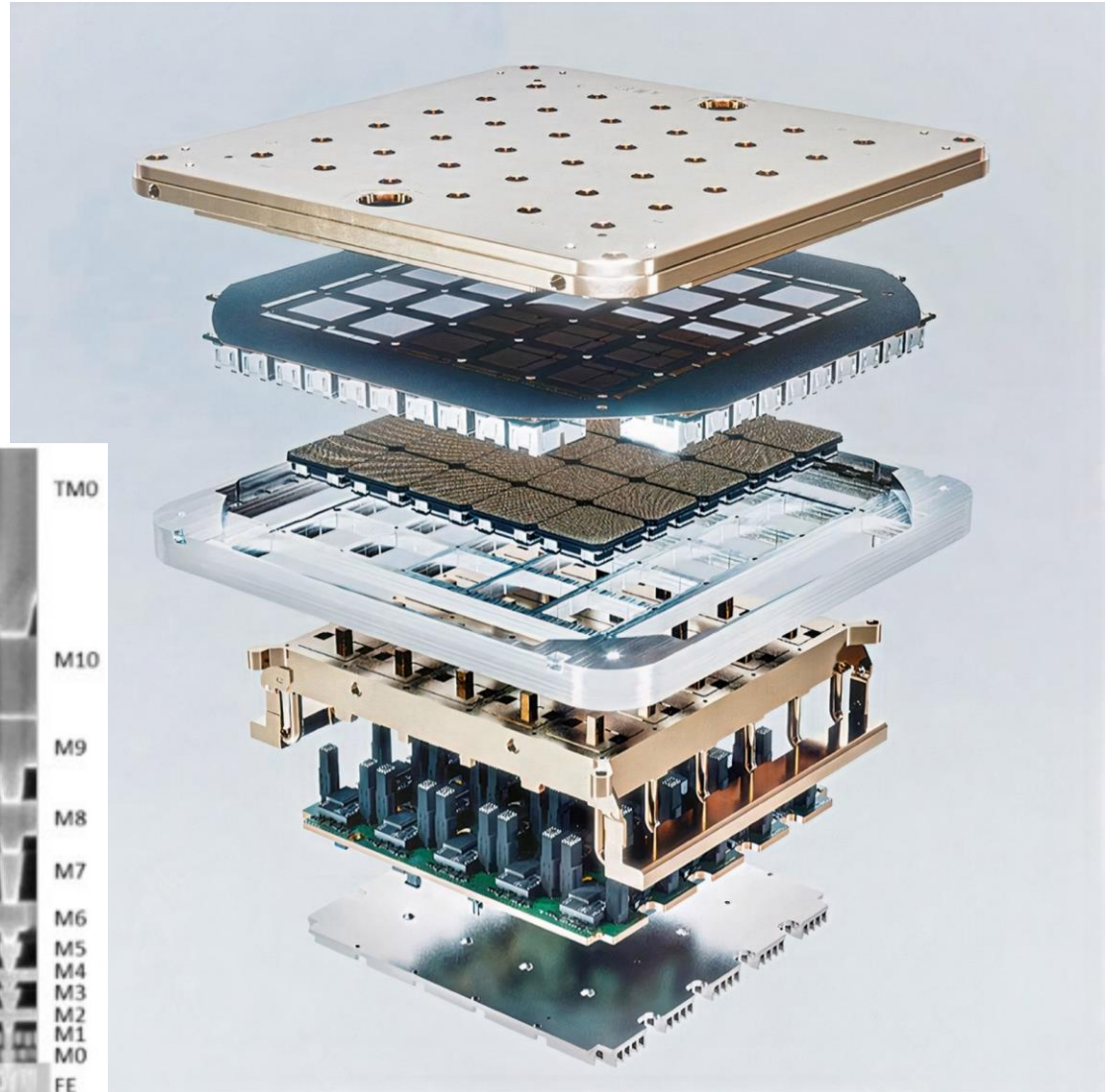
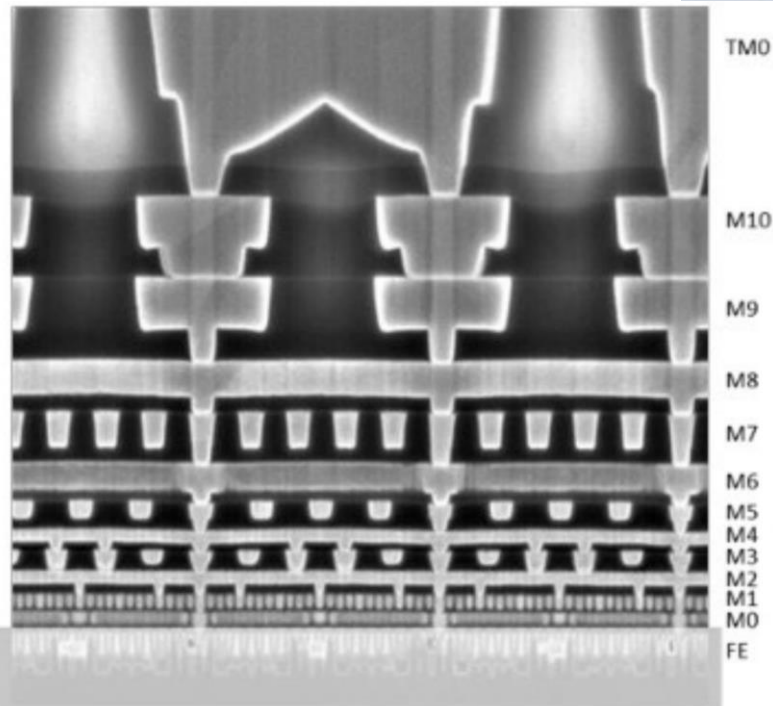
Физические пределы



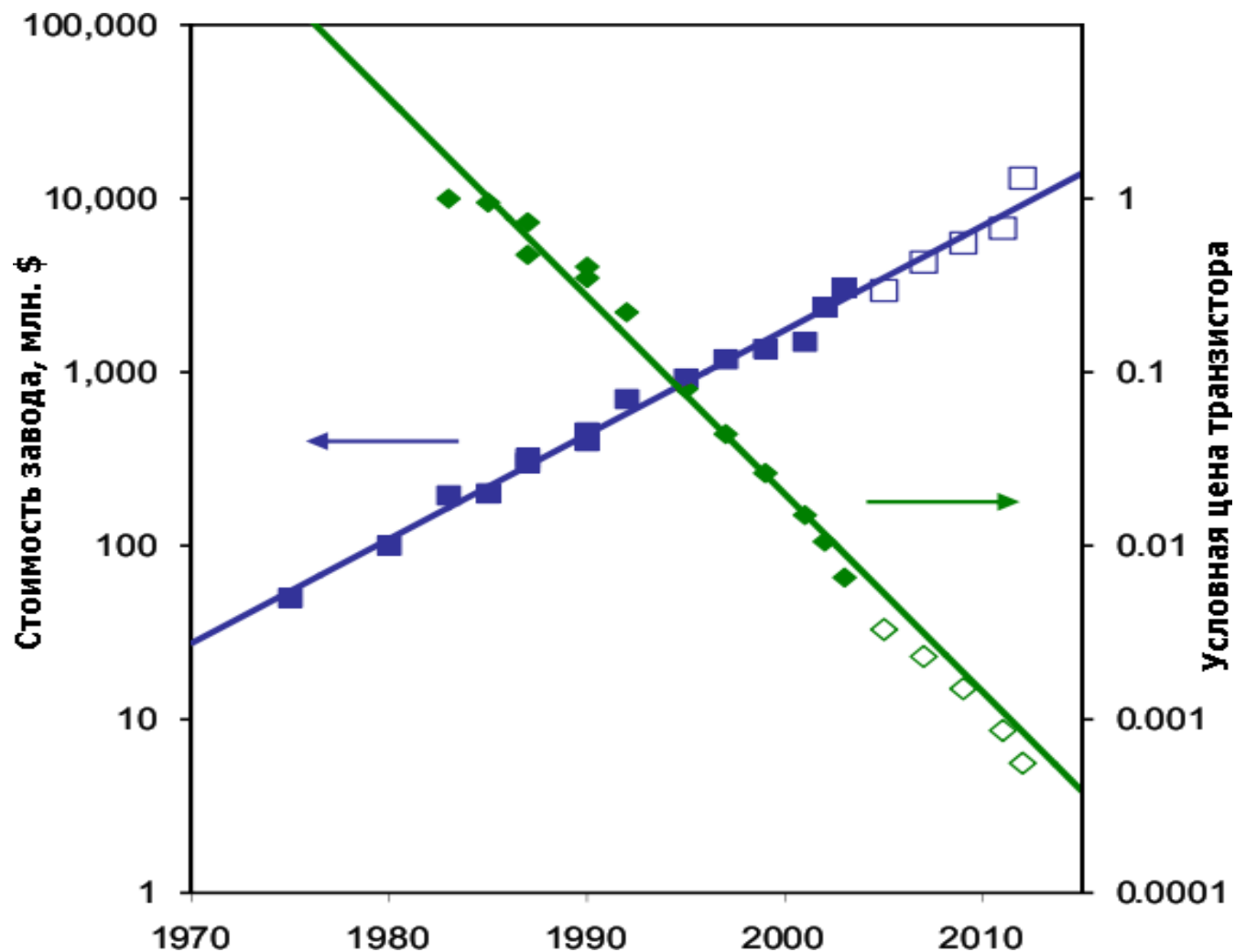
Разрешение фотолитографии – уходим в рентген? ¹⁹

Чип Tesla D1 Dojo содержит 50 млрд транзисторов, допускает масштабирование через шину межсоединений с пропускной способностью до 10 Тбайт/с и потребляет до 400 Вт — неудивительно, что он настолько сложно устроен (источник: Tesla)

3D news

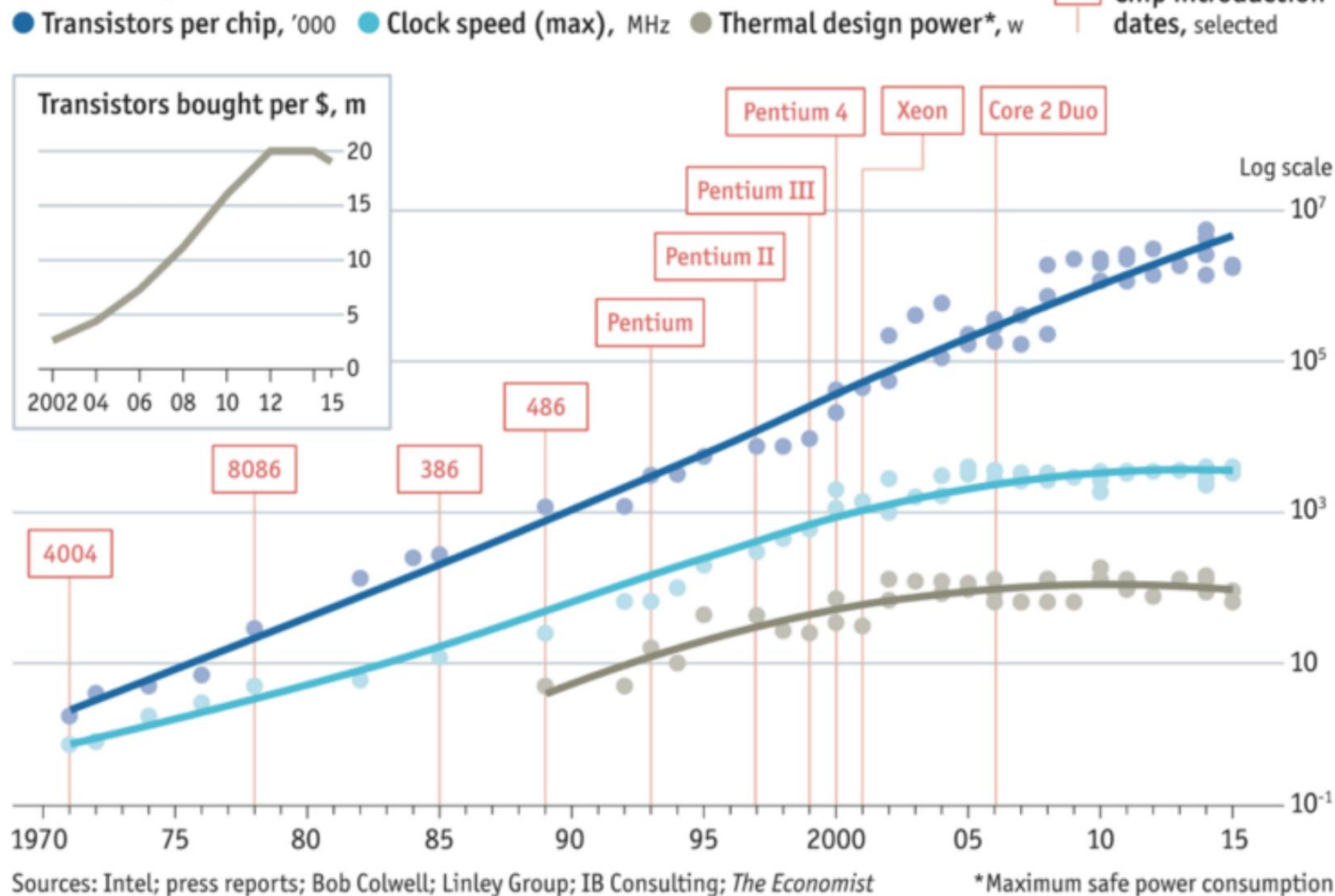


Технологии и экономика



Технологии и экономика

Stuttering



Ещё один взгляд на «закон Мура»: особенно хорошо видно, как на фоне по-прежнему довольно уверенно растущего числа транзисторов с середины первого десятилетия 2000-х выходят на плато и рабочая тактовая частота, и потребляемая мощность ЦП, а количество приобретаемых на доллар транзисторов (график на врезке) и вовсе начало падать с 2014 года (источник: ARTIS Ventures)

NO EXPONENTIAL IS FOREVER . . .

Gordon E. Moore

**NO EXPONENTIAL IS
FOREVER . . .**

BUT

WE CAN DELAY “FOREVER”

Gordon E. Moore