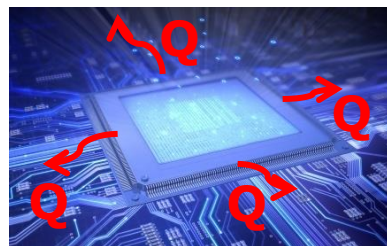
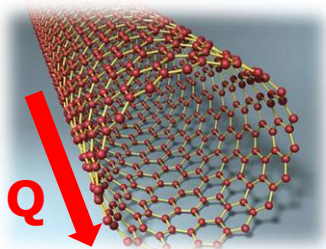




ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАНОЭНЕРГЕТИКЕ И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ: КАК ПРЕОДОЛЕТЬ «ТЕПЛОВУЮ СТЕНУ»



Дмитриев А.С., д.т.н., проф.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Институт тепловой и атомной энергетики, Москва
Samsung Electronics Expert Group & JSLab, Suwon, Korea
asdmitriev@mail.ru

Говорят, сегодня доклад по
тепловым процессам в
нанозлектронике...

Еще немного
полежим, и
пойдем...



**«Осторожно, обрыв,
назад, - сказал я,
и мы двинулись
вперед...»**



Тренды доклада:

1. Особенности тепловых процессов в наноэнергетике и наноэлектронике

2. Перенос тепла в наноструктурах: почему не выполняется закон Фурье

- носители энергии в наноструктурах и их особенности;

- эксперименты по переносу тепла в наноструктурах: нанопроволоки, нанотрубки, - двумерные кристаллы и т.д.;

- почему не выполняется закон Фурье для теплопереноса.

3. Системы и механизмы охлаждения и термостабилизации устройств наноэнергетики и наноэлектроники

- перегрев компонент наноэнергетики и наноэлектроники, закон Мура и «тепловая стена»;

- системы охлаждения и термостабилизации, современное состояние и эффективность.

4. Термоинтерфейсы на основе наноструктур и наноматериалов

- тепловое граничное сопротивление и его роль в переносе тепла наноструктурами;

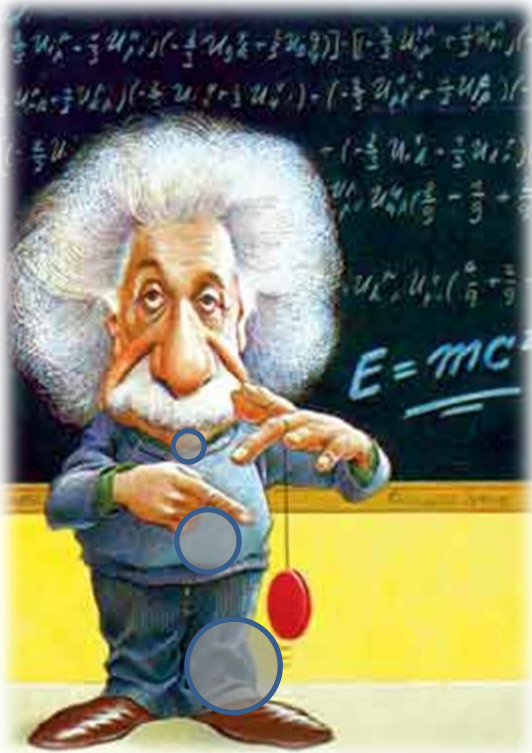
- современные виды термоинтерфейсов для наноэнергетики и наноэлектроники, их эффективность: последние результаты

5. Термоменеджмент и перспективные задачи нанофооники (термодиоды, термотранзисторы и т.п.)

- управление потоками тепла (термоменеджмент) и нанофооника;

- концептуальные системы «электроники» без электронов – термодиоды и термотранзисторы

6. Что дальше – энергетика и наноэнергетика на основе «бросового» тепла



**«Наш мир не завершенье –
Там дальше новый круг,
Невидимый как музыка,
Вещественный как звук!»**

«Как ни велики достижения кинетической теории теплоты в области физики газов, теория эта до сих пор не имеет под собой удовлетворительной механической основы...»

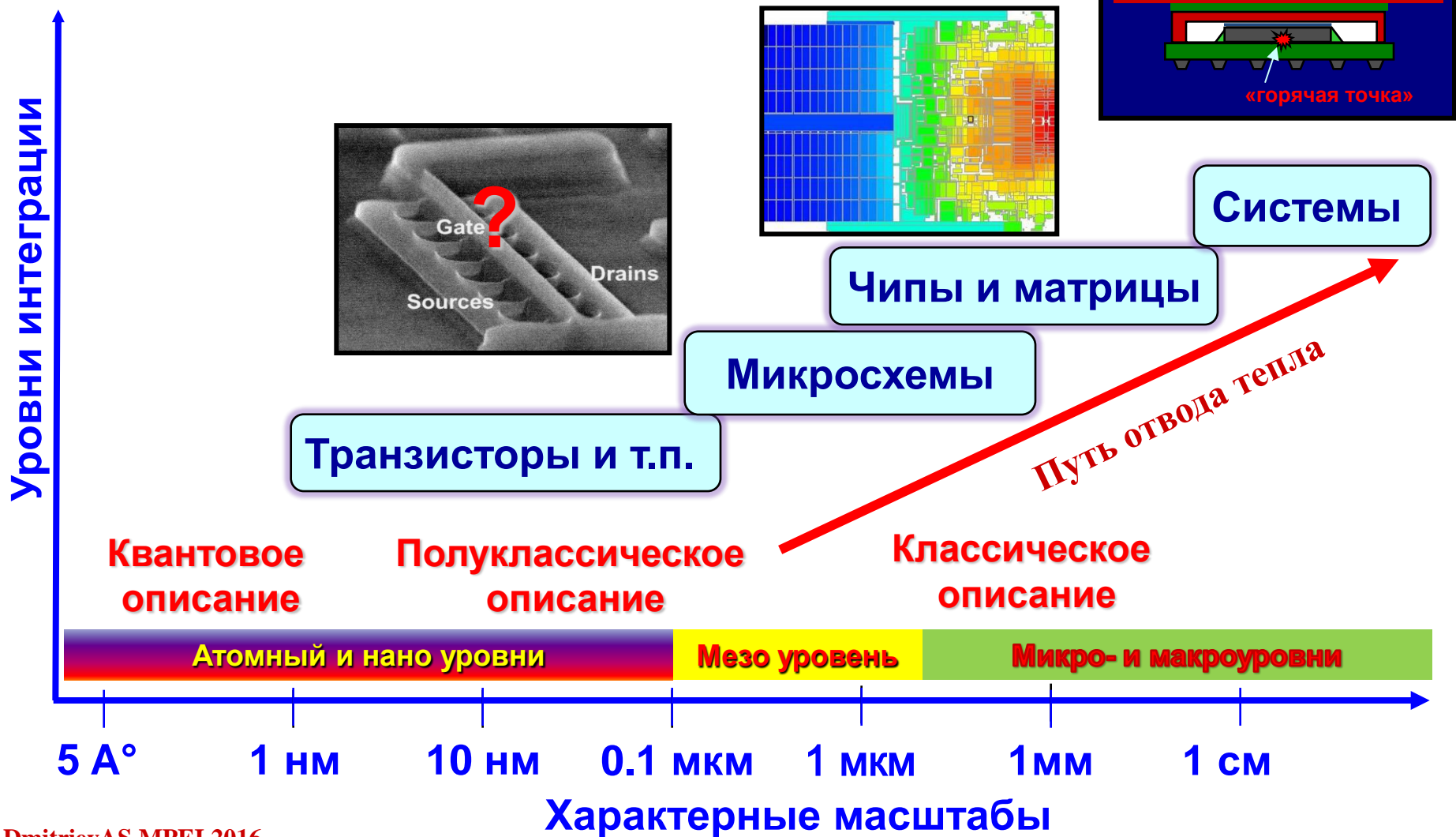
А. Эйнштейн, 1902



© Original Artist
Reproduction rights obtainable from
www.CartoonStock.com

1. Особенности тепловых процессов в наноэнергетике и наноэлектронике

Пространственные масштабы при внутреннем переносе энергии и тепла



Что такое наноэнергетика?

Это методы, системы и устройства, в которых используются нанотехнологии, наноконпоненты или наноматериалы



Схема различных способов преобразования, передачи и хранения энергии (химической, тепловой, солнечной и электрохимической) с применением нанотехнологий и наноматериалов

НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ В ТЕПЛОВОЙ И АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

НОВЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ:

- НАНОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ;
- НАНОКОМПОЗИТЫ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ;
- ПОЛИМЕРНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ ДЛЯ ФОТОВОЛЬТНИКИ И ТЕРМОФОТОВОЛЬТНИКИ;
- НАНОКОМПОЗИТЫ ДЛЯ ТОПЛИВНЫХ ЯЧЕЕК И СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА;
- НАНОКОМПОЗИТЫ КАК ЭЛЕКТРОДНЫЕ СИСТЕМЫ;
- НАНОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА (МИКРОПРОЦЕССОРЫ, ТРАНСФОРМАТОРЫ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И Т.П.) - ТЕРМОИНТЕРФЕЙСЫ;
- ТЕПЛООТВОДЫ ОТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ

1D, 2D И 3D НАНОМАТЕРИАЛЫ:

- НАНОПРОВОЛОКИ И НАНОТРУБКИ ДЛЯ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСОВ;
- ГРАФЕН И ЕГО ГИБРИДЫ КАК ТЕРМОИНТЕРФЕЙСЫ;
- УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ;
- УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ;
- УПРАВЛЕНИЕ СМАЧИВАНИЕМ И РАСТЕКАНИЕМ;
- УПРАВЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИЕЙ И ОЧИСТКОЙ;
- НОВЫЕ ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ;
- НАНОПРОВОЛОКИ, НАНОТРУБКИ И ДВУМЕРНЫЕ И КВАЗИДВУМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ И СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

НАНОЖИДКОСТИ:

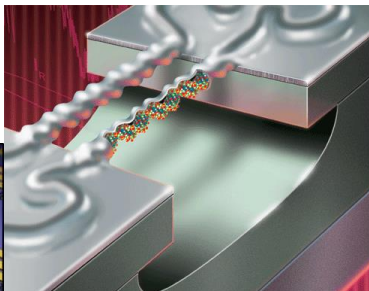
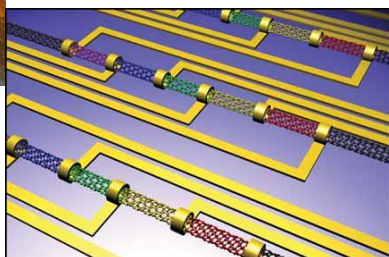
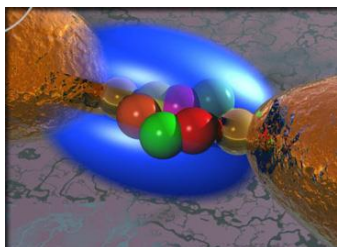
- НОВЫЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ;
- ОПТОФЛЮИДИКА И СИСТЕМЫ БИО- И МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ;
- СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ТОПЛИВА;
- ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

ДРУГИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАНОЭНЕРГЕТИКИ И НАНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СЛАБОТОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА (НАНОЭЛЕКТРОНИКА И НАНООПТОЭЛЕКТРОНИКА)

НАНОЭЛЕКТРОНИКА



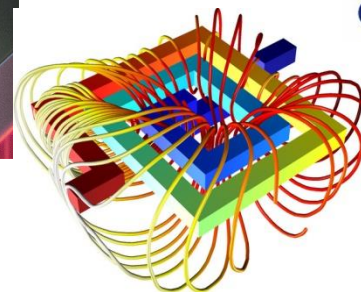
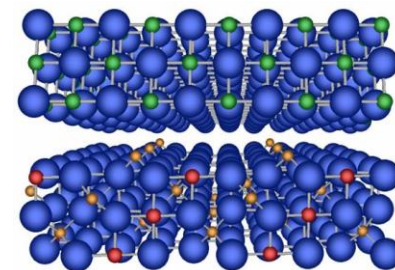
- КРЕМНИЕВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА;
- ЭЛЕКТРОНИКА НА НАНОТРУБКАХ;
- ЭЛЕКТРОНИКА НА ГРАФЕНЕ;
- МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА;
- НАНОТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ;
-



ОПТОЭЛЕКТРОНИКА



- ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ;
- СВЕТОДИОДЫ – НЕОРГАНИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЧЕСКИЕ;
- МОЛЕКУЛЯРНАЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКА;
- ОПТОФЛЮИДИКА;
-

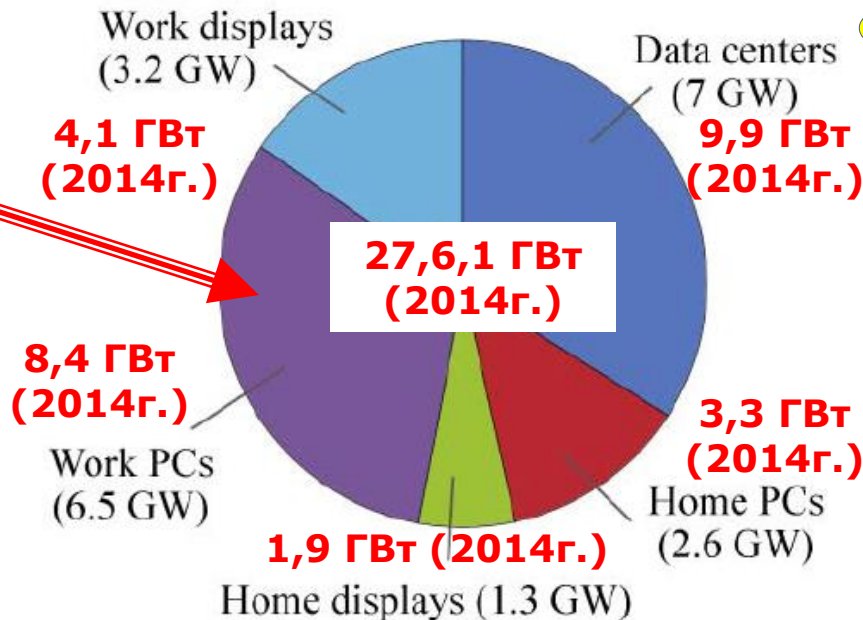
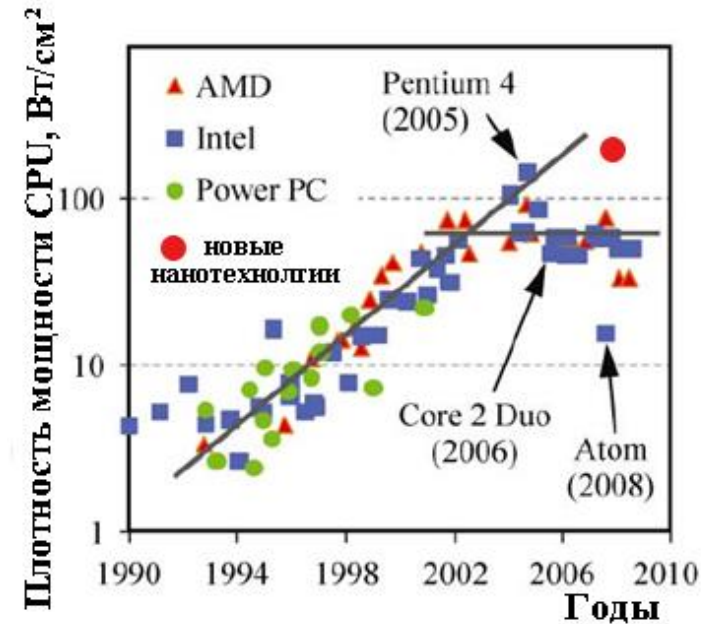
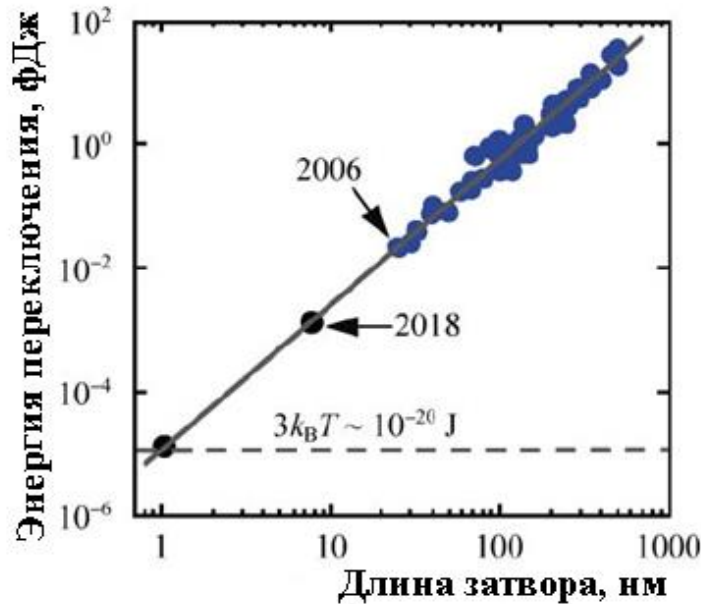


ПОЧЕМУ ТАК ВАЖНЫ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

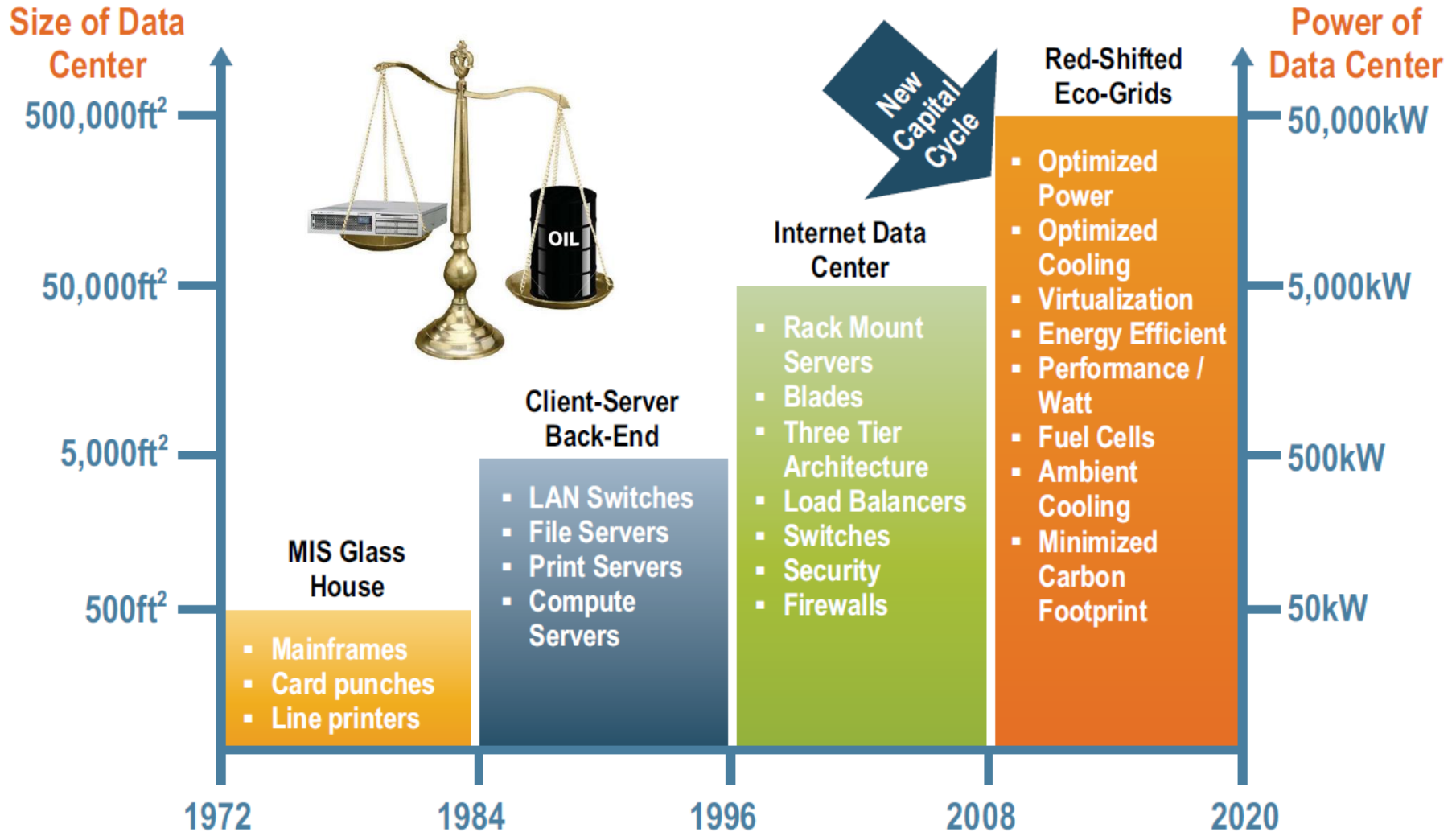
Интернет
использует около
9,8% всей
электроэнергии,
вырабатываемой
на земном шаре!!!

Общее
тепловыделение
в системах IT

Всего в 2012г.
27,6 ГВт тепла –
работа более, чем
20 атомных
электростанций!!!



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦЕНТРОВ ДАННЫХ (ПОТРЕБЛЕНИЕ БОЛЕЕ 15% ВСЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ К 2035Г.)



2. Перенос тепла в наноструктурах: почему не выполняется закон Фурье

Теплоперенос тепла в твердых телах в основном происходит электронами и фононами (коллективными колебаниями кристаллической решетки). В диэлектриках и полупроводниках – только фононы

Закон Фурье для переноса тепла $\vec{q} = -\lambda \nabla T$

Теплопроводность λ для обычных материалов не зависит от размеров тела

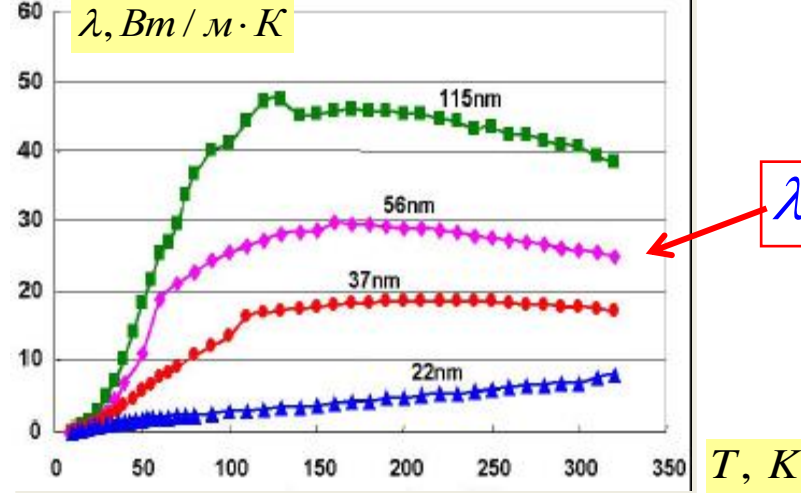
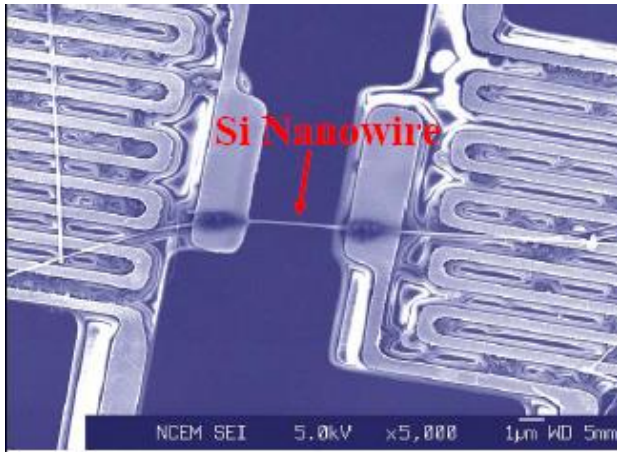
В наноструктурах имеют место классические и квантовые размерные эффекты для фононов и можно ожидать, что стандартный закон Фурье может быть нарушен.

Причины:

- ❖ спектр фононов (зависимость частоты фононов от волнового импульса меняется;
- ❖ характер рассеяния фононов с потерей импульса и энергии (именно эти процессы отвечают за теплопроводность) меняются);
- ❖ существенным становится граничное рассеяние;
- ❖ существенным становится тепловое термического сопротивление при движении фононов между телами или через тепловые барьеры (например, в неоднородных материалах)

Нанопроволоки – нет закона Фурье

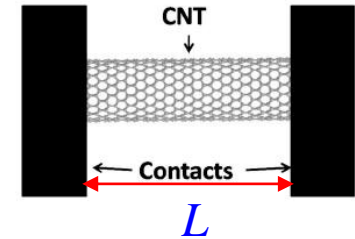
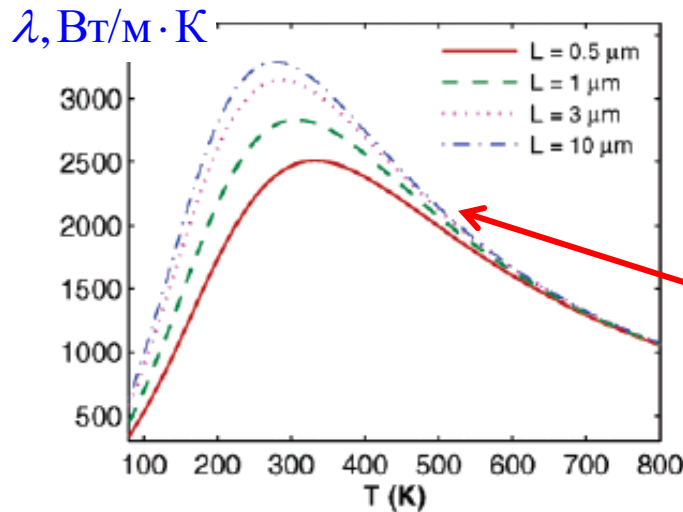
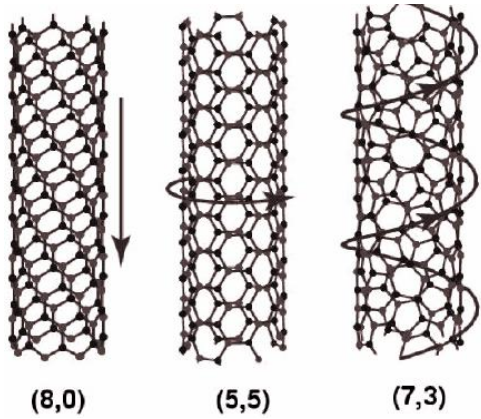
$\lambda_b = 135 \text{ Вт/мК}$ при 300К (для объемных материалов)



$\lambda = f(d)!!!$

Экспериментально показано, что нанопроволока диаметром около 20 нм из кристаллического кремния имеет теплопроводность около 10 Вт/м·К, что на два порядка меньше, чем для объемного образца!!!

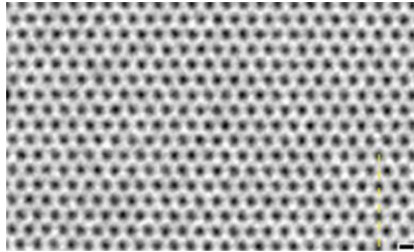
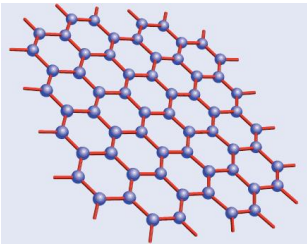
Нанотрубки – нет закона Фурье



$\lambda = f(L)!!!$

$$\lambda_{ph} \sim \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{\omega^n + A/L} \sim L^{(n-1)/n}$$

Теплоперенос тепла в 2D – графен



Графен

(Нобелевская премия по физике 2010г.; А. Гейм, К. Новоселов)

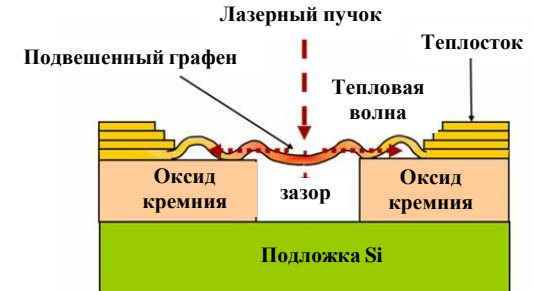
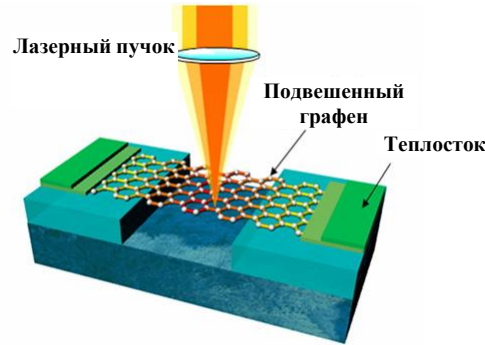
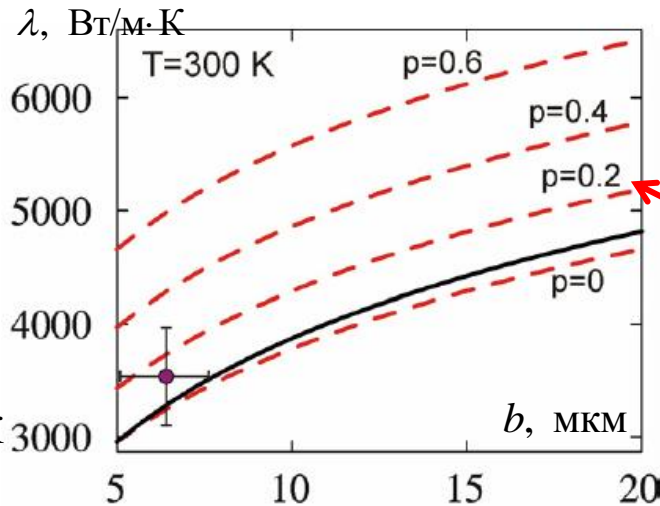
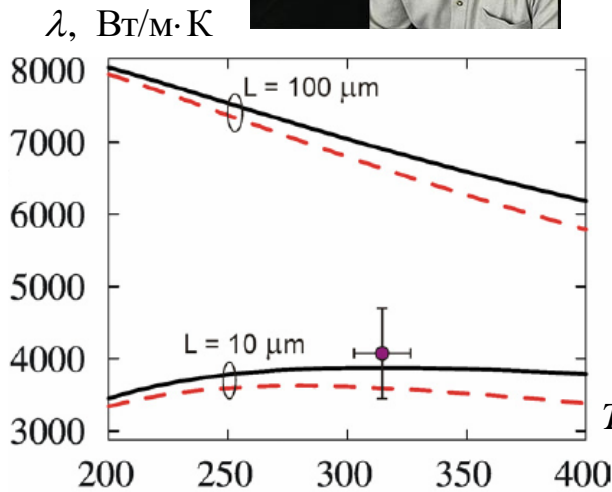


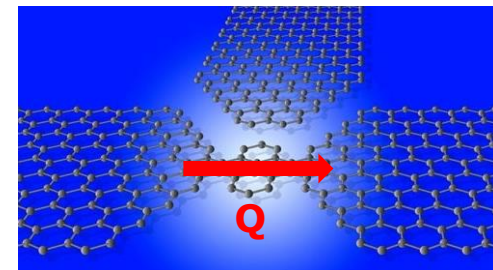
Схема измерения теплопроводности бесконтактным оптическим методом рамановского рассеяния



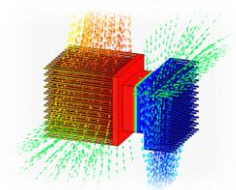
Нет закона Фурье!!!

$$\lambda = f(b)!!!$$

Теплопроводность графена как функция температуры и ширины ленты (b)



3. СИСТЕМЫ И МЕХАНИЗМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ УСТРОЙСТВ НАНОЭНЕРГЕТИКИ И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ



Основные проблемы:

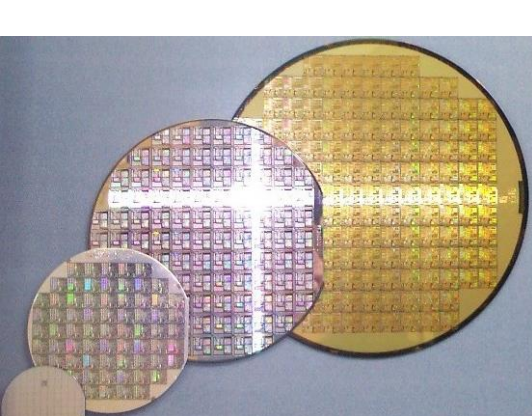
- ❖ переход на малоразмерные компоненты;
- ❖ усиление интеграции и развитие архитектуры цифровых устройств;
- ❖ использование наноконструкций и наноструктур (нанопроволоки, нанотрубки, графен и другие двумерные кристаллы, нанокомпозиты и т.п.);
- ❖ увеличение плотности мощности энерговыделения в элементах устройств (процессоры, элементы памяти, элементы питания и т.п.);
- ❖ увеличение диссипации тепла во все более малых масштабах и рост плотности тепловыделения до 100-200 МВт/м²;
- ❖ необходимы все более экзотические методы термостабилизации и охлаждения элементов и устройств электроники и оптоэлектроники;
- ❖ необходимость преодоления «тепловой стены» в законе Мура

Закон Мура:

«Степень интеграции увеличивается в четыре раза за три года»

«Крылатое» высказывание Гордона Мура, одного из создателей фирмы Intel, лидера в разработке и производстве сверхбольших интегральных схем:

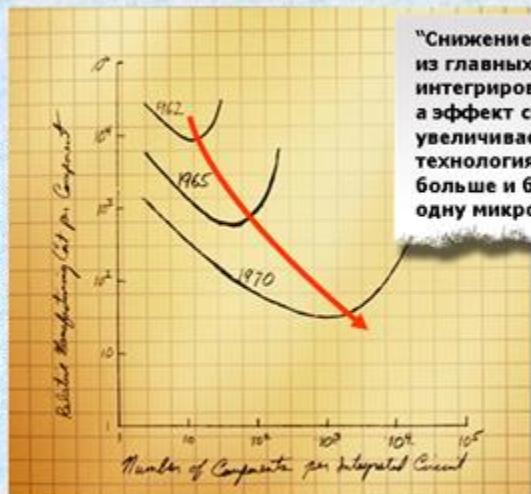
«Если бы автомобилестроение развивалось со скоростью эволюции полупроводниковой промышленности, то сегодня «РолсРойс» мог бы проехать полмиллиона миль на одном галлоне бензина и дешевле было бы его выбросить, чем заплатить за парковку»



Закон Мура

Гордон Мур, 1965

Себестоимость компонента

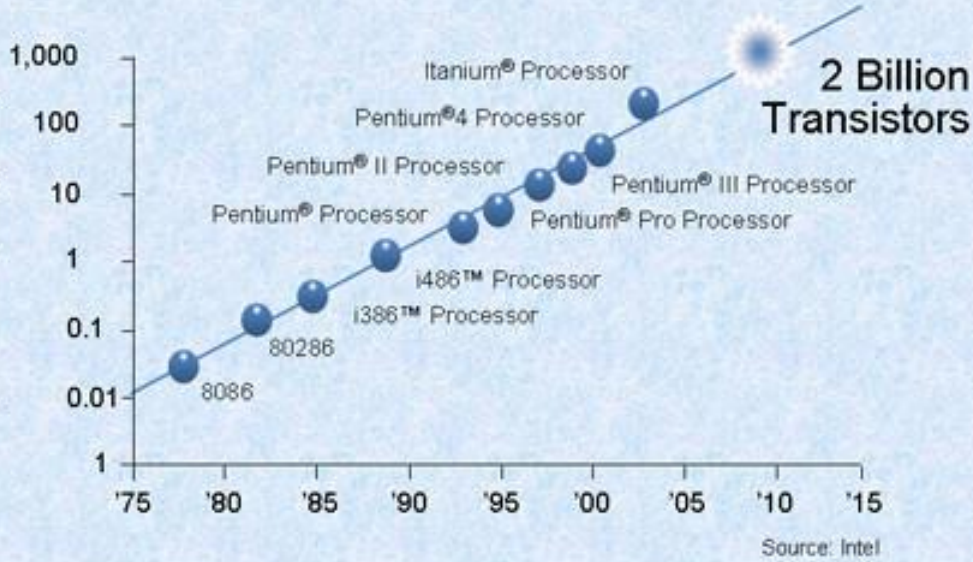


"Снижение себестоимости - одна из главных причин создания интегрированной электроники, а эффект снижения только увеличивается по мере того, как технология позволяет поместить все больше и больше возможностей в одну микросхему".



Количество компонентов в микросхеме

Транзисторы (млн.)



Source: Intel

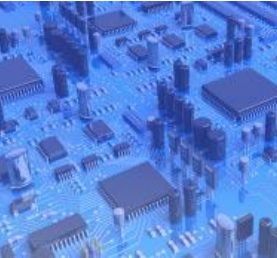
- Количество транзисторов на единице поверхности удваивается каждые 18 месяцев ([закон Мура](#))

Число выпускаемых ежегодно транзисторов более 10^{19} – в сто раз больше числа муравьев, живущих на Земле!!!



Gordon Moore estimated in 2003 that the number of transistors shipped in a year had reached about 10,000,000,000,000,000,000 (10^{19}). That's about 100 times the number of ants estimated to be in the world.

Copyright © 2006 Intel Corporation. All rights reserved.



Do You know the Moore's Law?



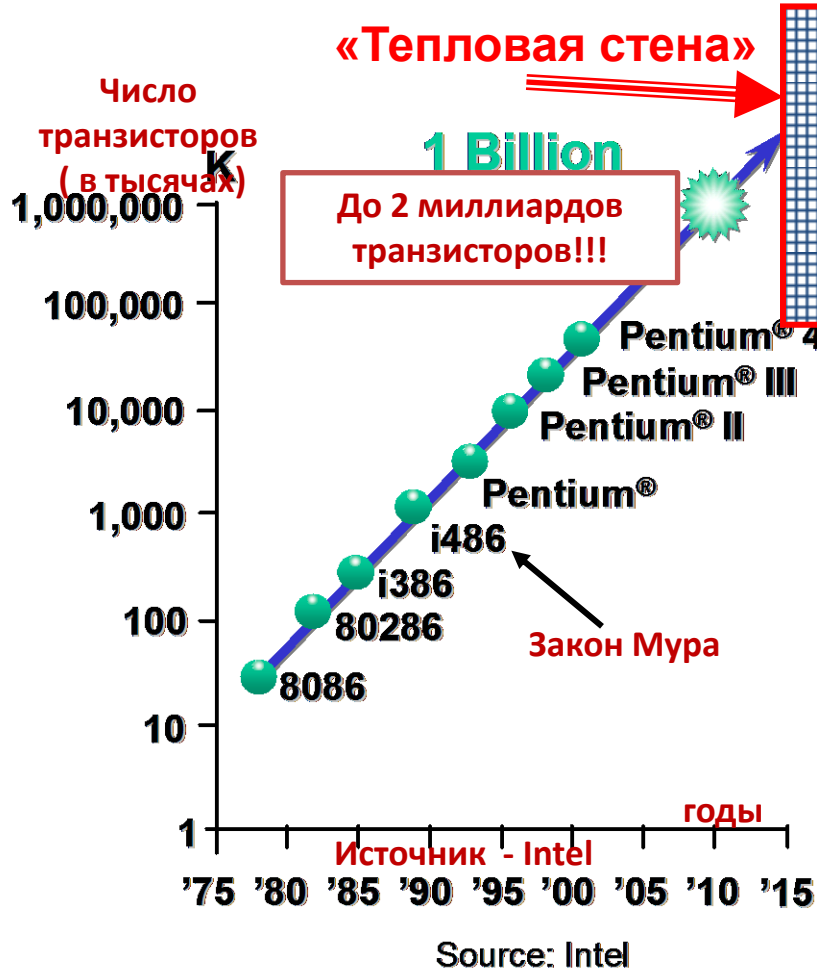
знаешь закон Мура?



Тепловая стена в микро- и наноэлектронике

Закон Мура может быть нарушен появлением «тепловой стены»!!!

Эволюция плотности транзисторов

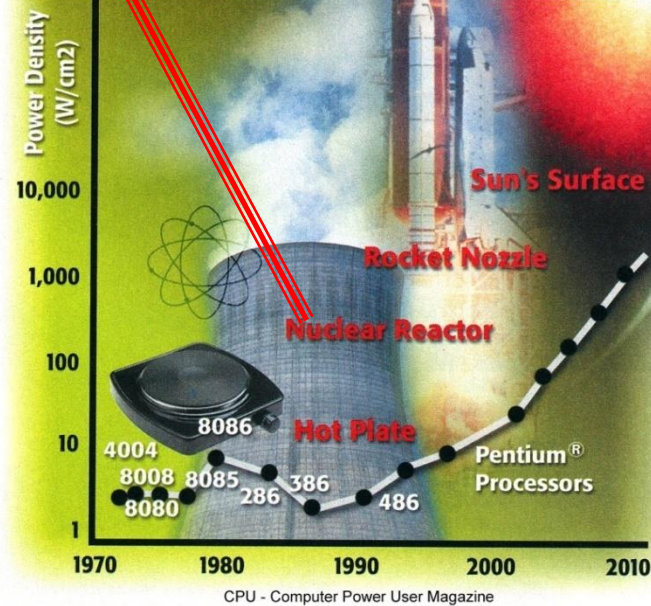


Типичные источники энергии

100 МВт/м²

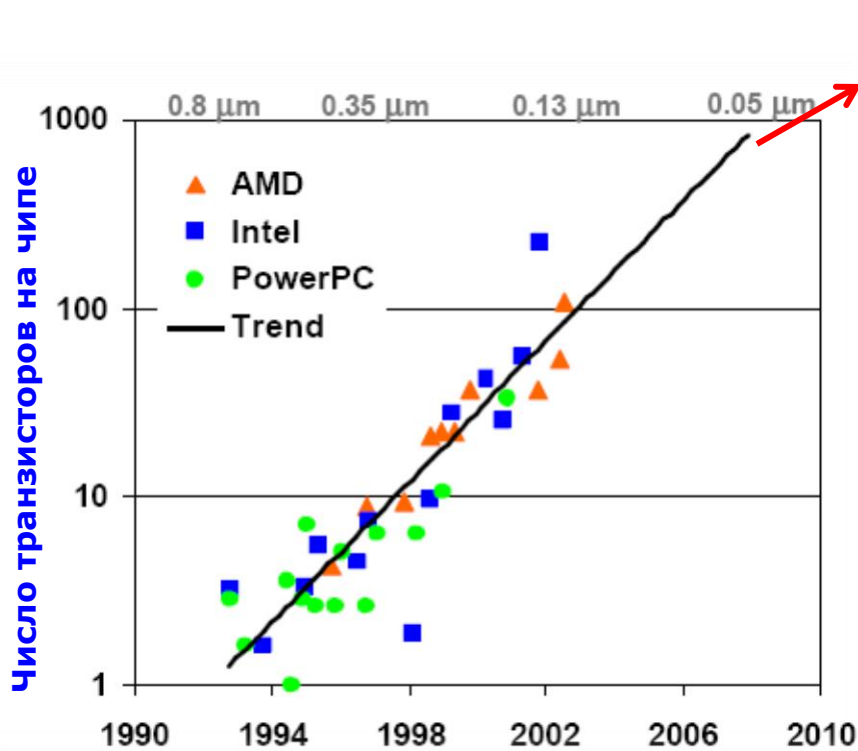
Как в ядерном реакторе!!!

Power Density Extrapolation



Электроника/Оптоэлектроника → генерация локализованных высоких плотностей энергии и тепла

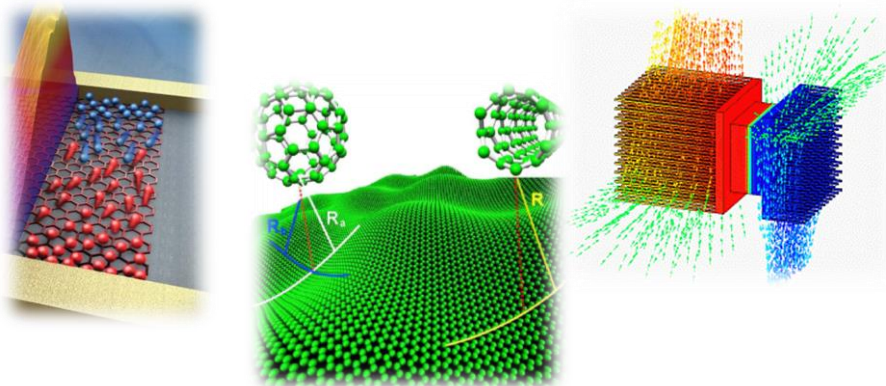
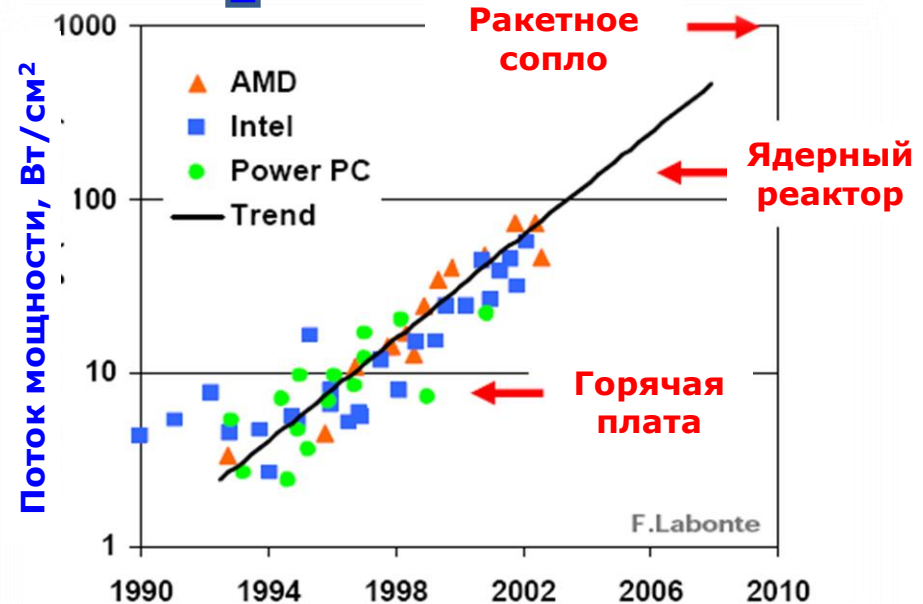
Вызов тепловым процессам в транзисторных технологиях



☀ 8–12 нм!!!

(2015-2016гг.)

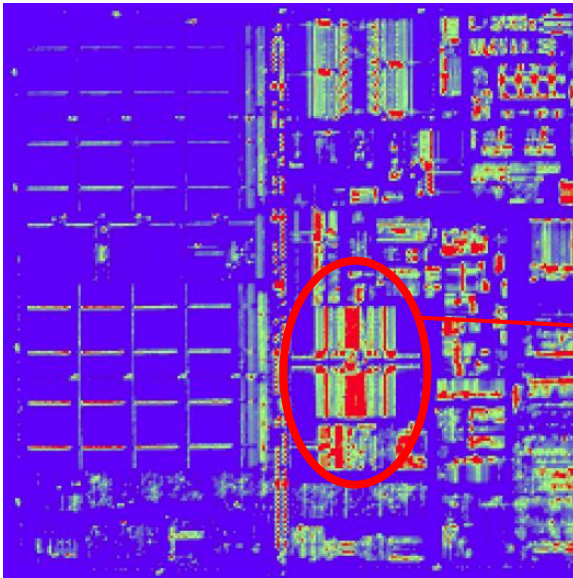
Что будет на таких масштабах с диссипацией и утилизацией тепла?



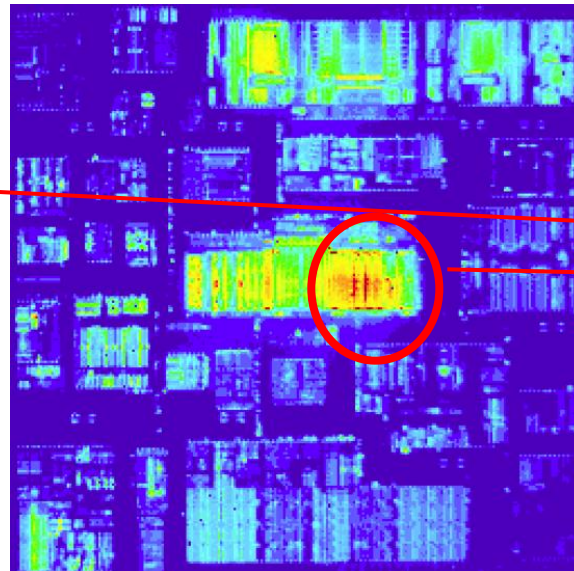
Нагрев и утилизация тепла в микроэлектронике

- возрастание плотности транзисторов и возрастание скорости передачи сигналов приводит к возрастанию температуры чипа;
- CMOS – чип может иметь микроскопическое «горячее пятно» с тепловым потоком больше, чем 200 Вт/см^2 ;
- нагрев в силовой электронике и оптоэлектронике может достигать величин $> 1000 \text{ Вт/см}^2$;
- традиционный термоэлектронный кулер способен обеспечить теплосъем только порядка 10 Вт/см^2

Intel Pentium® III Processor



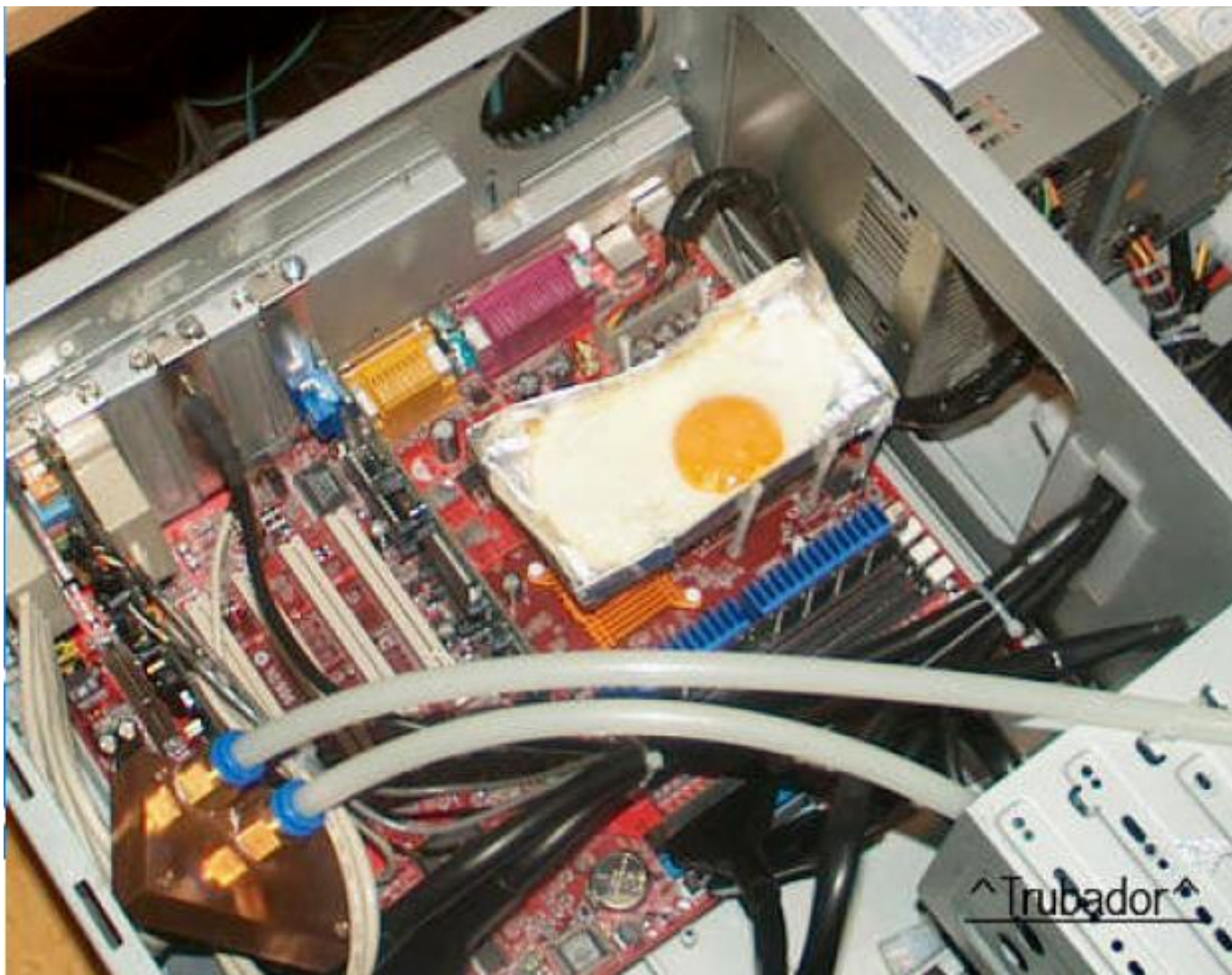
Intel Itanium® Processor



«горячие точки»
(hot spots)

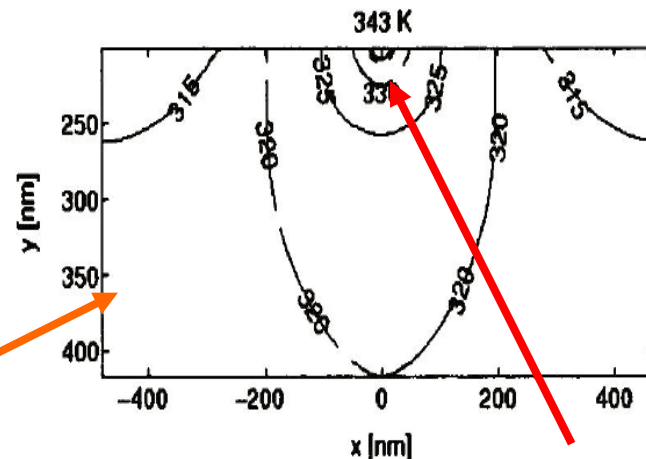
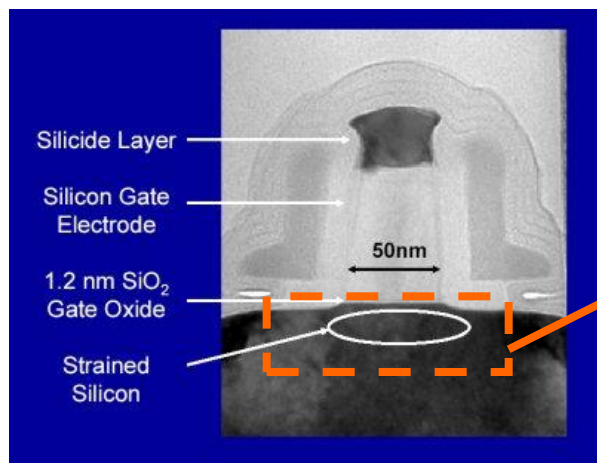
**Имеется ли
возможность
утилизировать тепло
от горячих точек?**

Нагрев и утилизация тепла в микроэлектронике



Температурные градиенты внутри микро- и наноструктур

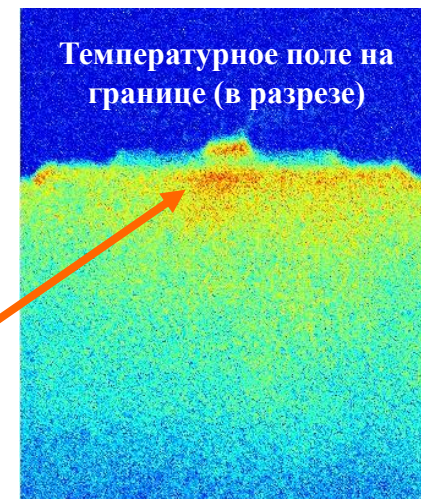
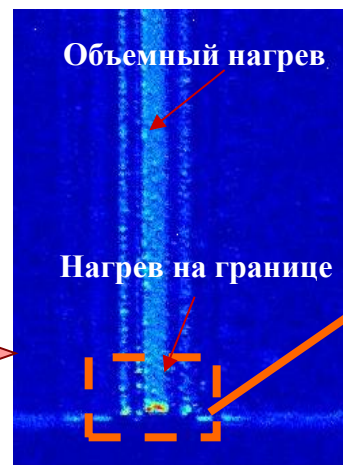
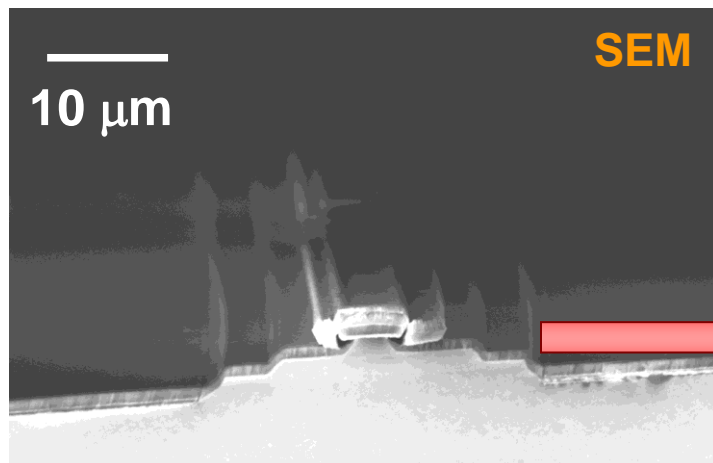
Транзистор (Intel 90nm MOSFET)



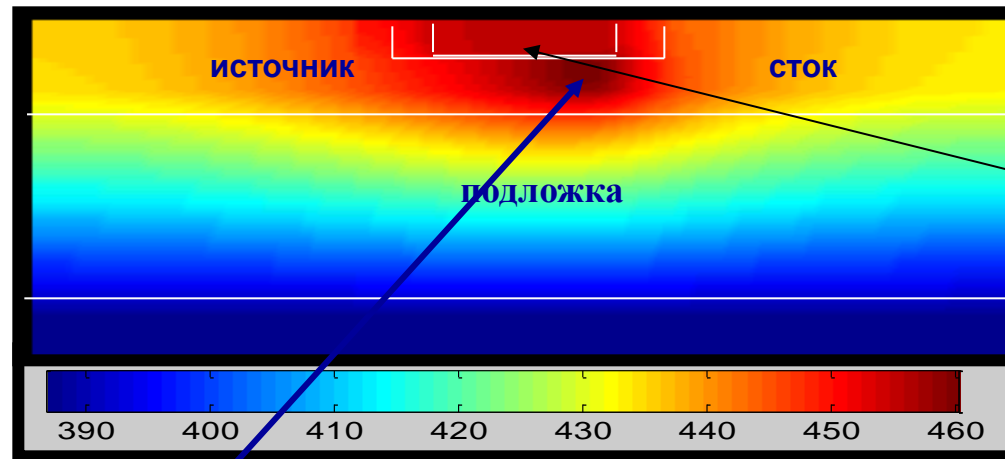
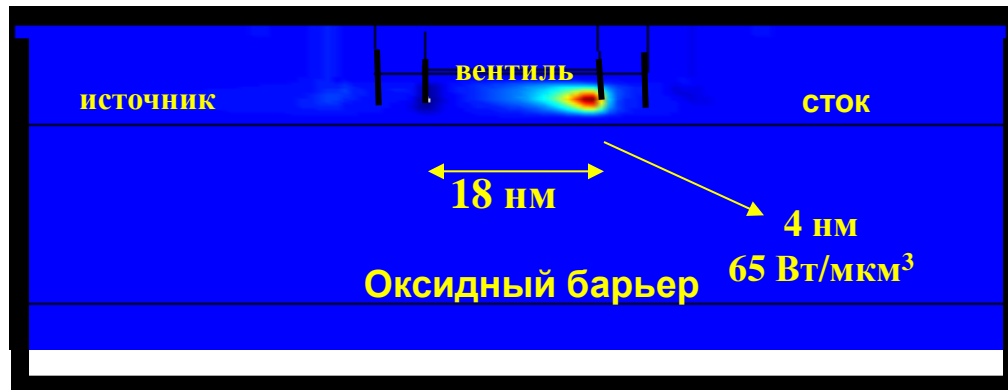
> 5 Вт/мкм³ тепла от источника радиусом около 20 нм

Можно ли эффективно охладить «горячее пятно»?

Полупроводниковый лазер



Характерное распределение температуры в перспективном транзисторном узле



$T(\text{K})$

Перегрев в «горячей точке» - на $50\text{-}90 \text{ }^\circ\text{C}$

– это «тепловая трагедия»!

$V \approx 4,5 \text{ В}; \delta \approx 15 \text{ нм} \Rightarrow$
напряженность поля $E \approx 3 \cdot 10^8 \text{ В/м} !!!$

Кремниевая наноэлектроника

- диссипация тепла влияет на скорость и надежность
- масштабность (характерные размеры) устройств ограничены диссипацией мощности



Перегрев транзистора
может составлять

50-70 °C !

Скорость деградации
транзисторного узла
возрастает до 5-10 раз!

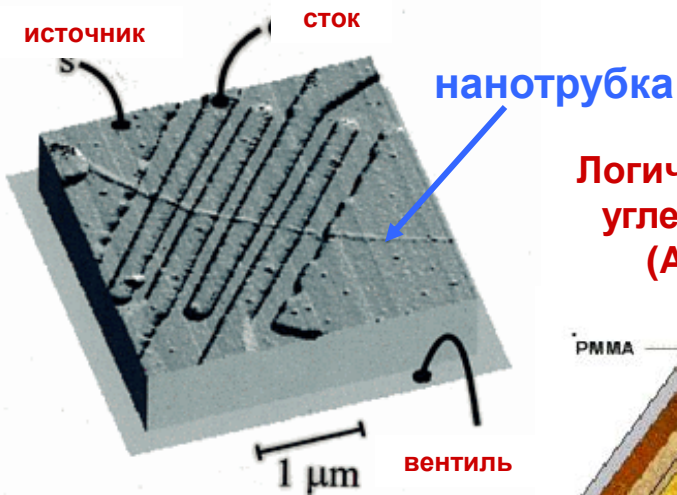
при перегреве на 100 °C !

IBM Silicon-On-Insulator (SOI) Technology

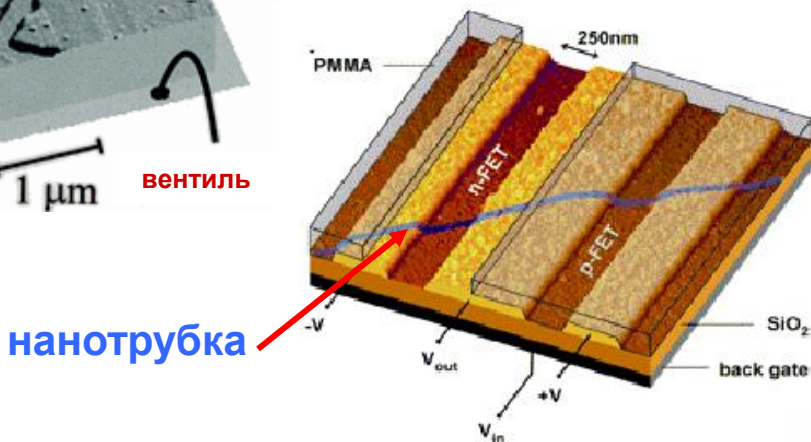
Углеродная наноэлектроника

- диссипация тепла влияет на скорость и надежность
- масштабность (характерные размеры) устройств ограничены диссипацией мощности

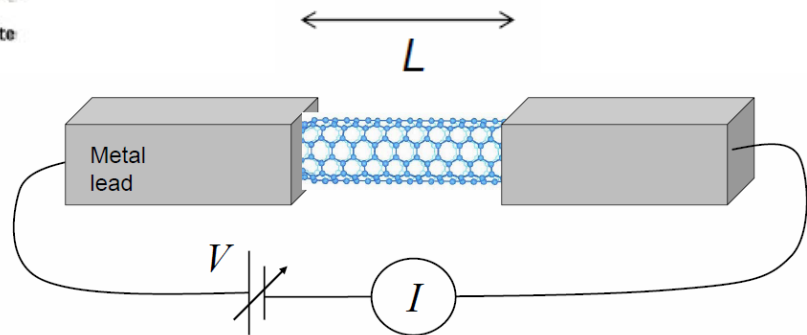
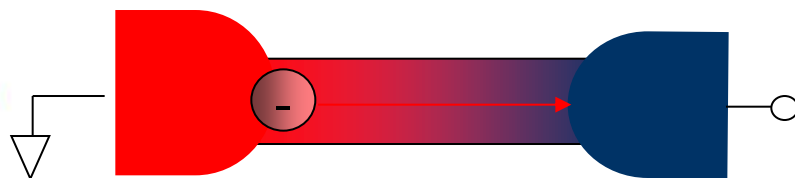
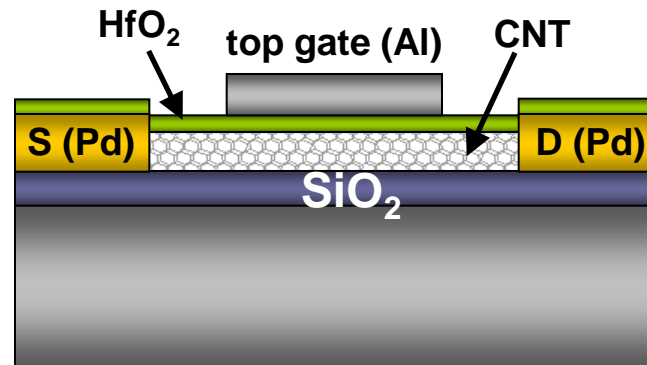
Полевой эмиссионный транзистор на углеродной нанотрубке (McEuen et al., Berkeley)



Логическое устройство на углеродной нанотрубке (Avouris et al., IBM)



Транзисторный узел на УНТ (Javey et al., Phys. Rev. Lett. (2004))



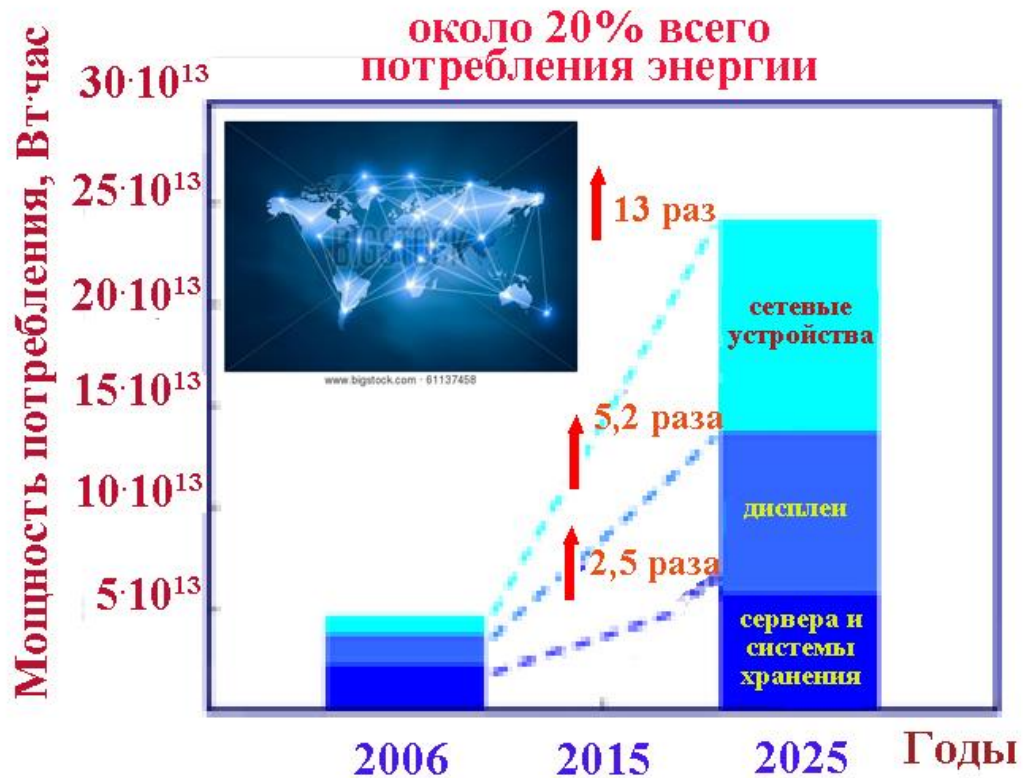
- плотность тока - до 10^9 А/см²
- баллистический перенос заряда

Какой механизм переноса тепла?

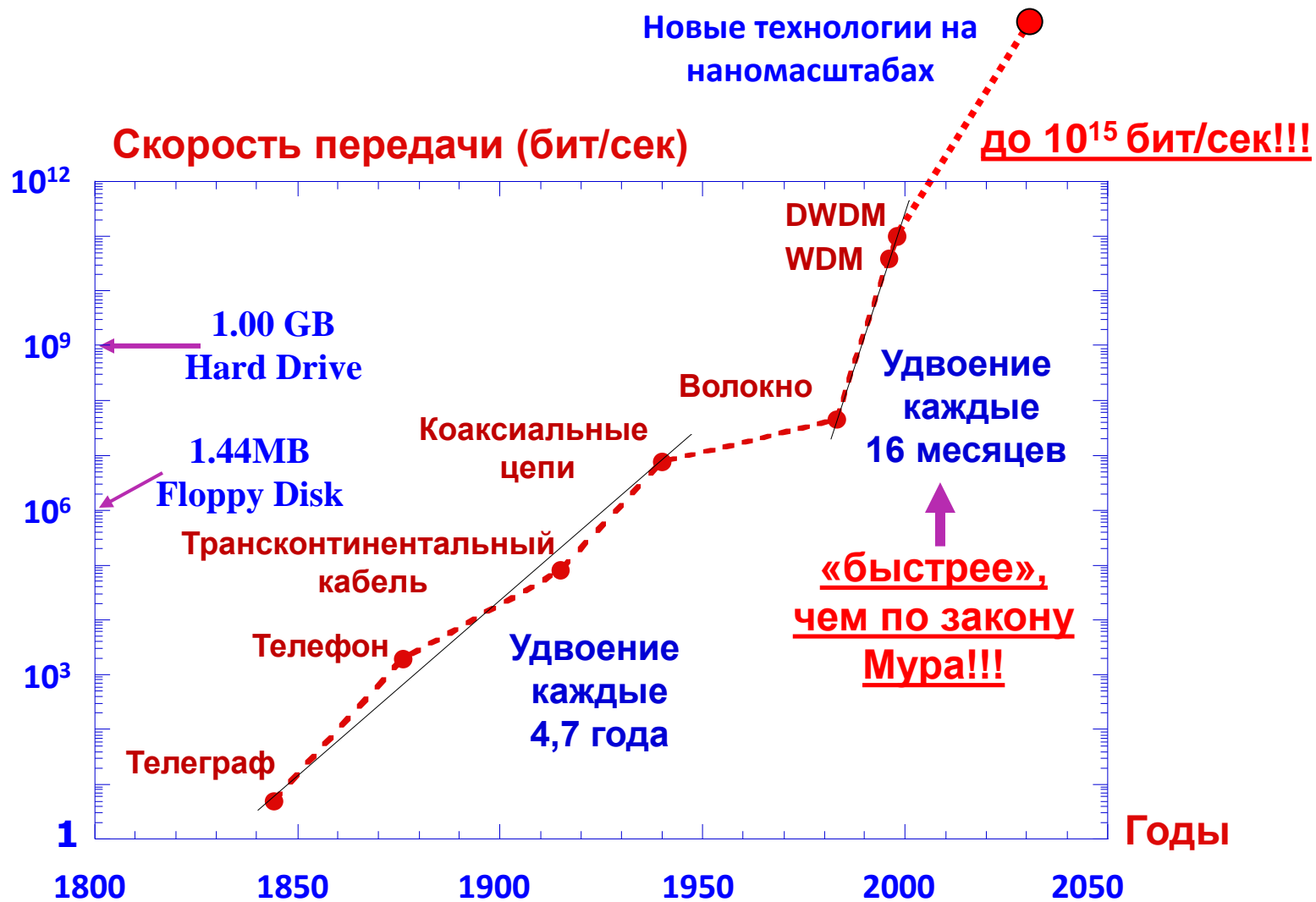
Тепловые процессы и лимитирование тепловыделения в микро- и наноэлектронике



~ 240 миллиардов кВт*час



Эволюция скорости передачи данных



1. Howard Banks, "Life at 100 billion bits per second", Forbes Magazine, Oct. 6, 1997

2. www.ibm.com

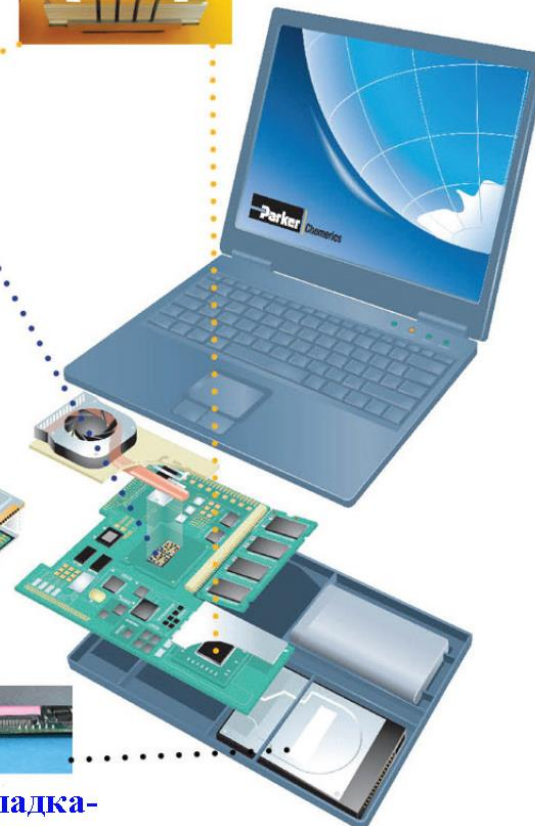
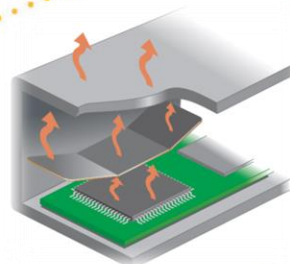
4. Термоинтерфейсы на основе наноструктур и наноматериалов

Термоинтерфейсные материалы (ТИМ) для бытовой электроники и информационных технологий

ТИМ на фазовых переходах



ТИМ смазки и гели



ТИМ ленты

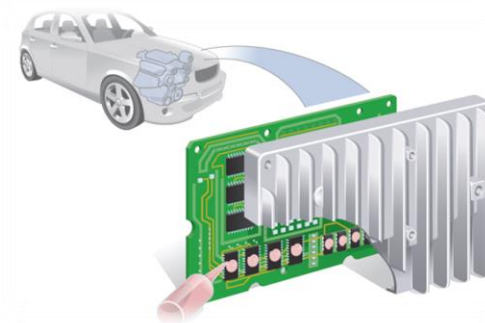
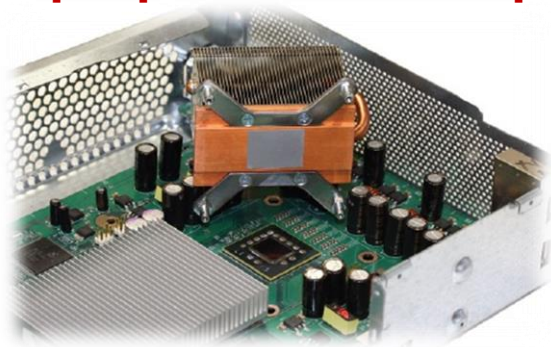


Дисперсный ТИМ

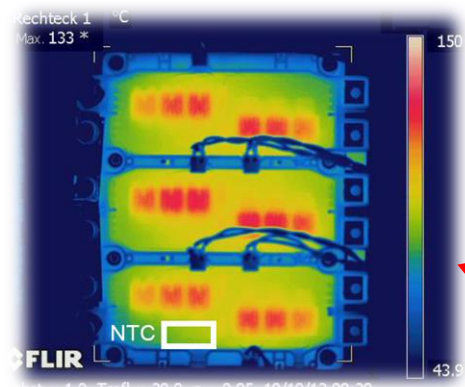


ТИМ прокладка-заполнитель

Серверы и компьютеры



Автомобильная электроника



Сильноточная электроника

Термоинтерфейсы (ТИМ)



Оптоэлектроника

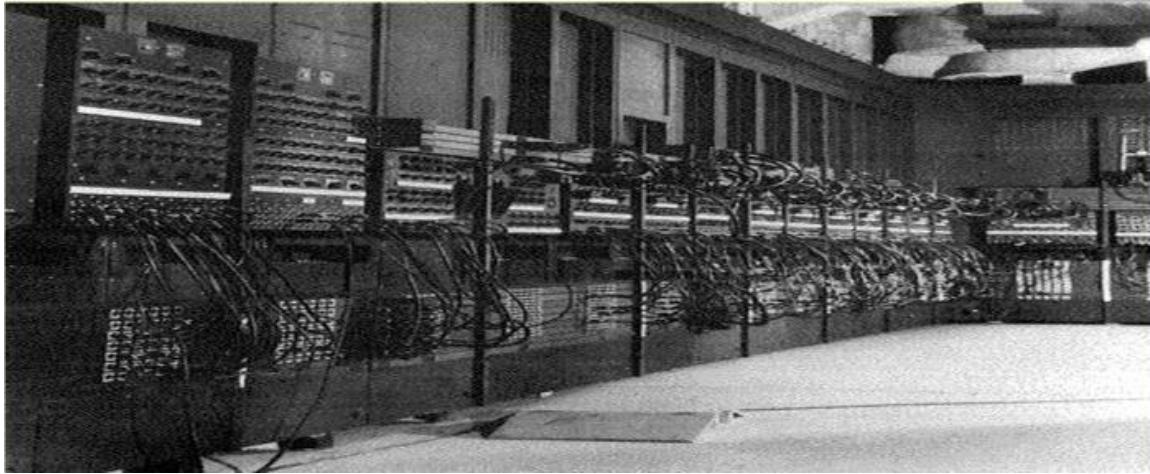


Системы коммуникаций

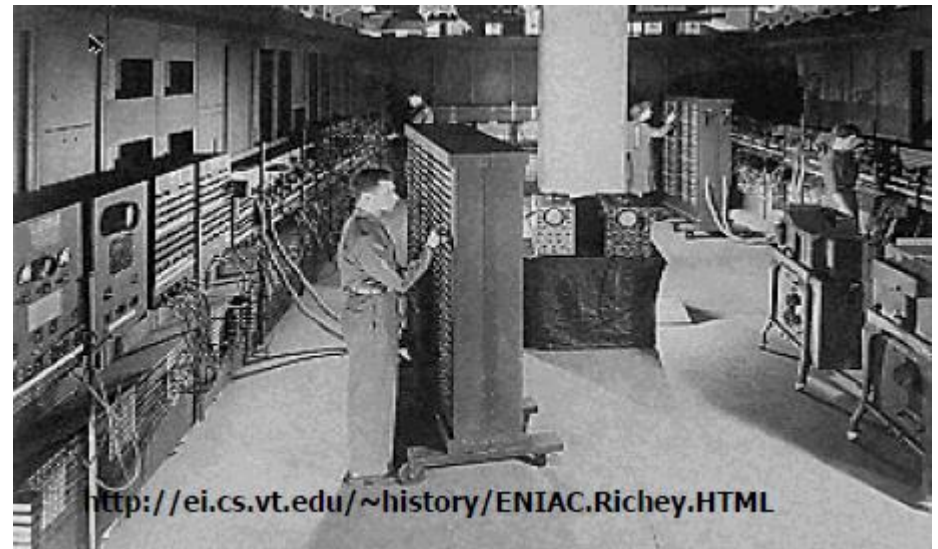
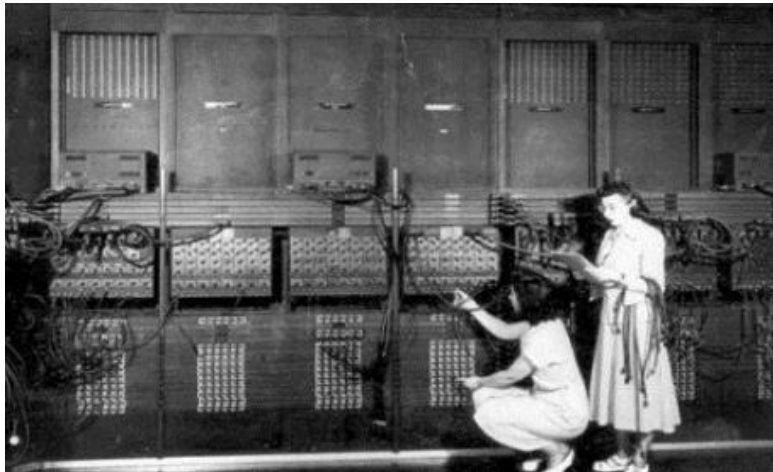


Военная электроника

КОМПЬЮТЕР ЭНИАК (1946)



**Система водяного
охлаждения (54
литра/минута) и
воздушное
охлаждение
помещений**



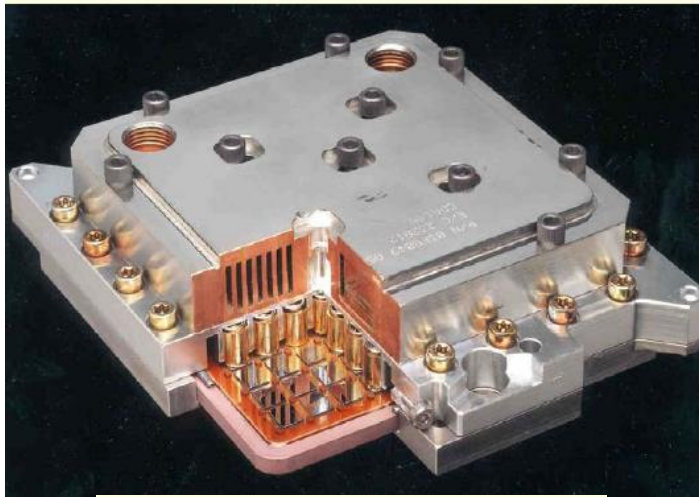
<http://ei.cs.vt.edu/~history/ENIAC.Richey.HTML>



IBM Mark I Mainframe (1950's)



IBM System 360; SLT Chips: 1964



IBM TCM Module



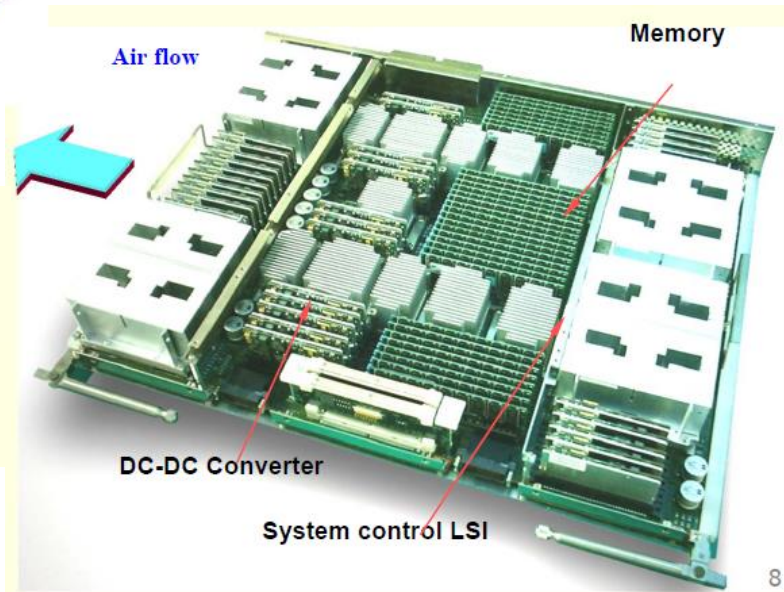
IBM 3081

Системы воздушного и водяного охлаждения

ВОЗДУШНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ, 90-е ГОДЫ

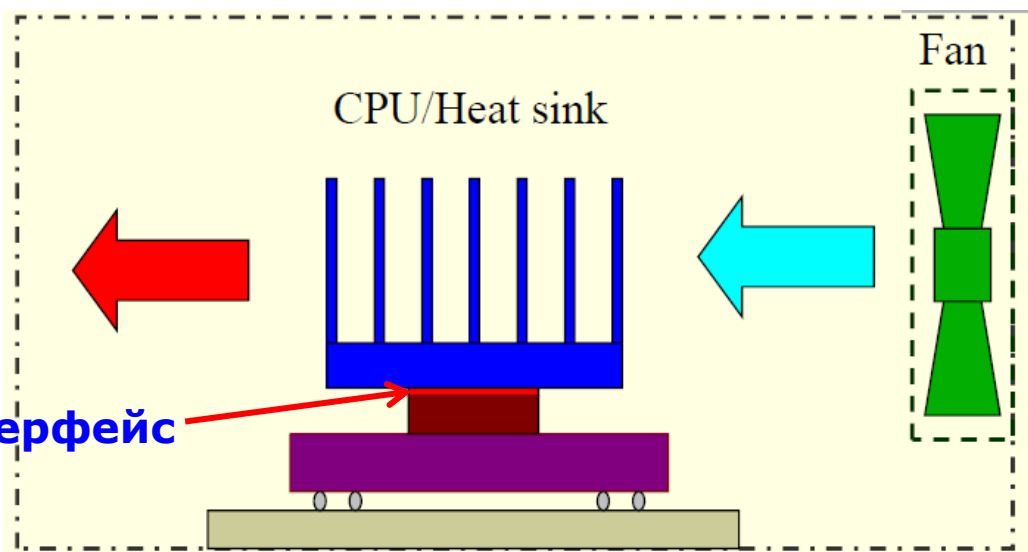
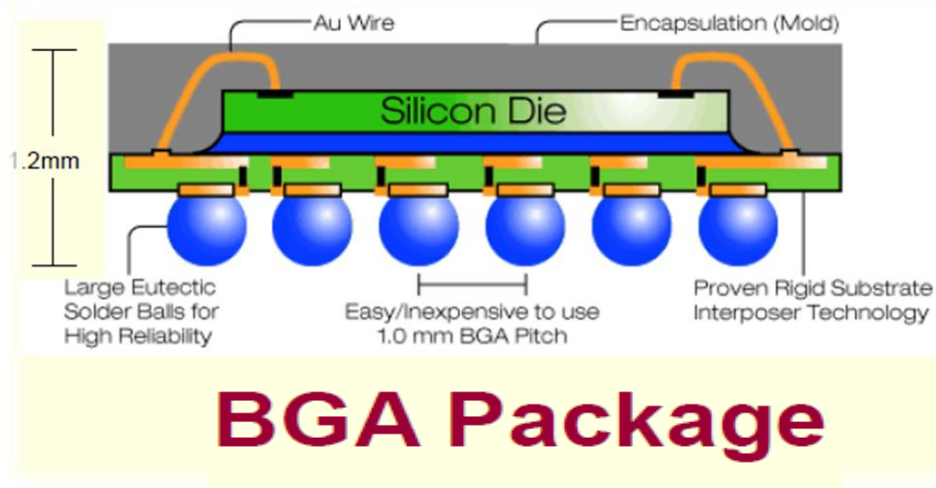
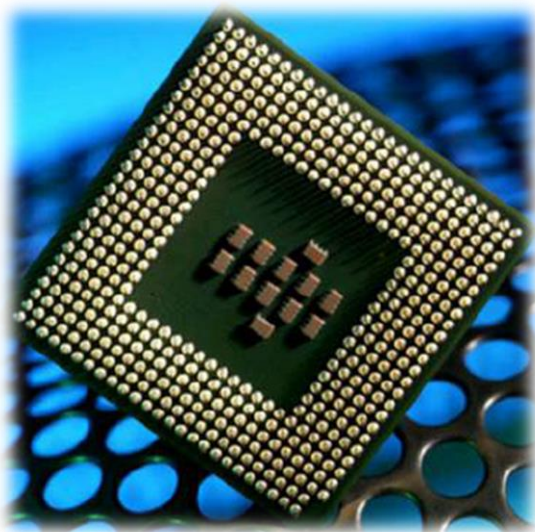


8CPU
470x580x80
1600W
Airflow ~ 3.5 m/s



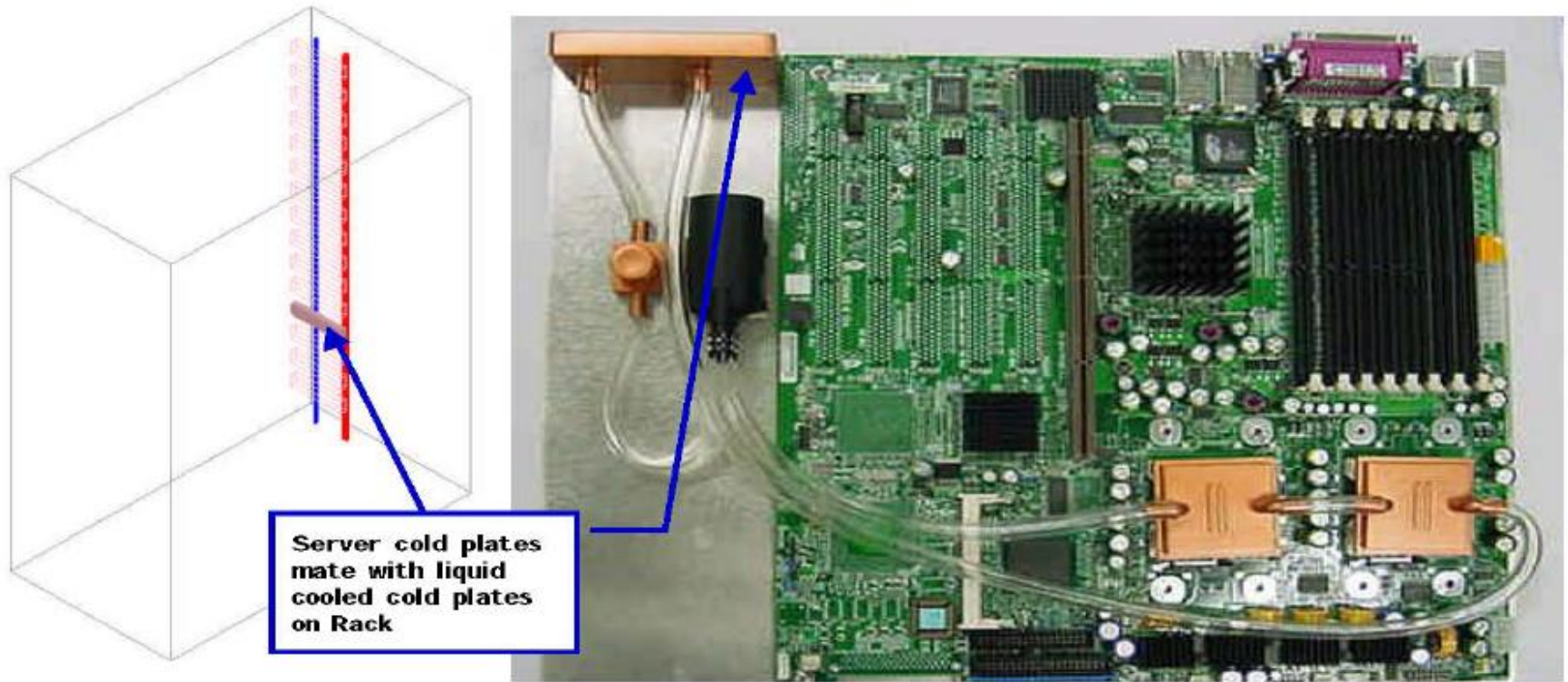
BGA технология

(Ball grid array — массив шариков — тип корпуса поверхностно монтируемые интегральные микросхемы)

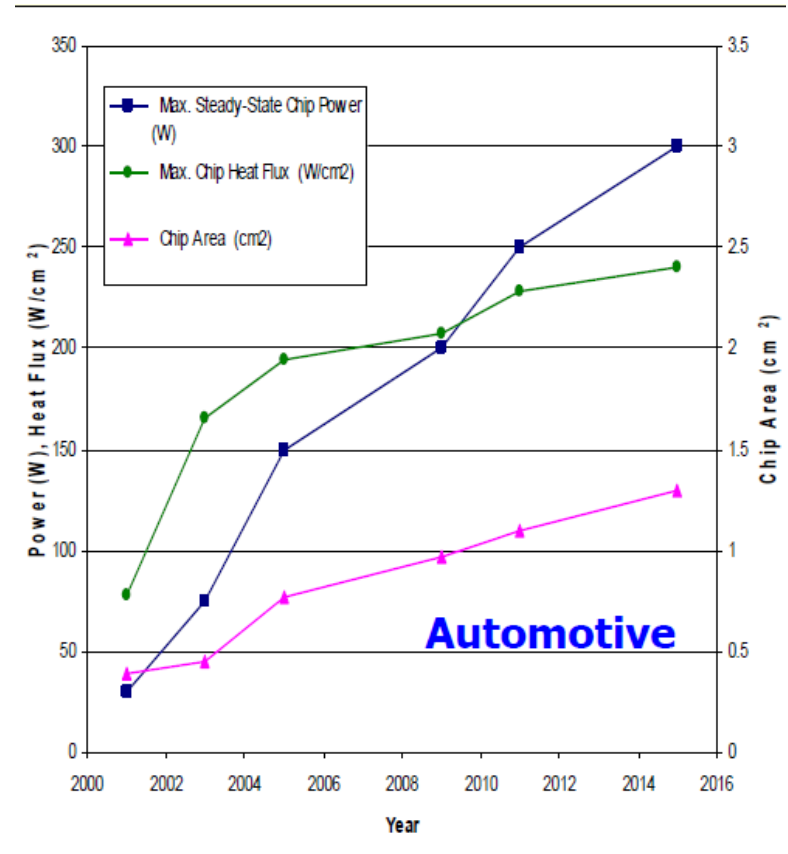
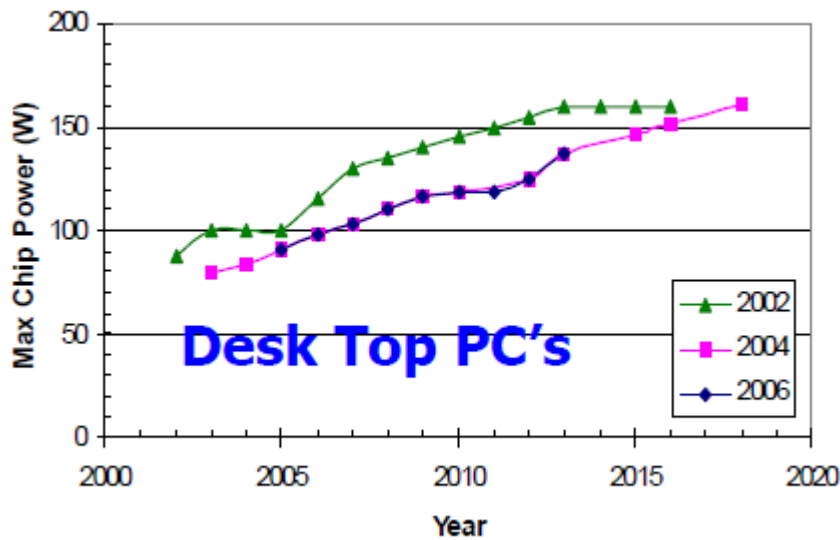
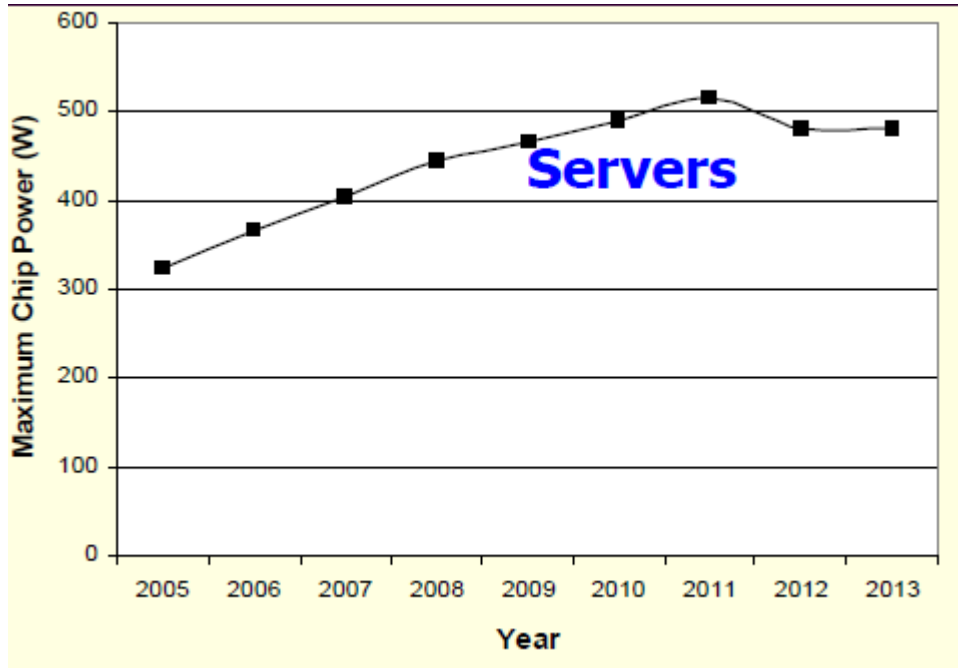


МИКРОКАНАЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ПЛАТ

Closed Liquid Loop Prototype – to Liquid

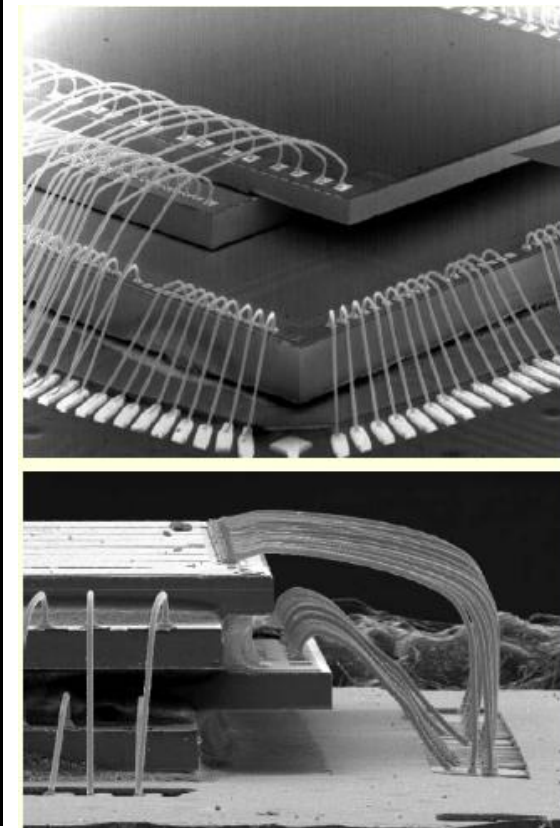


ТРЕНДЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ



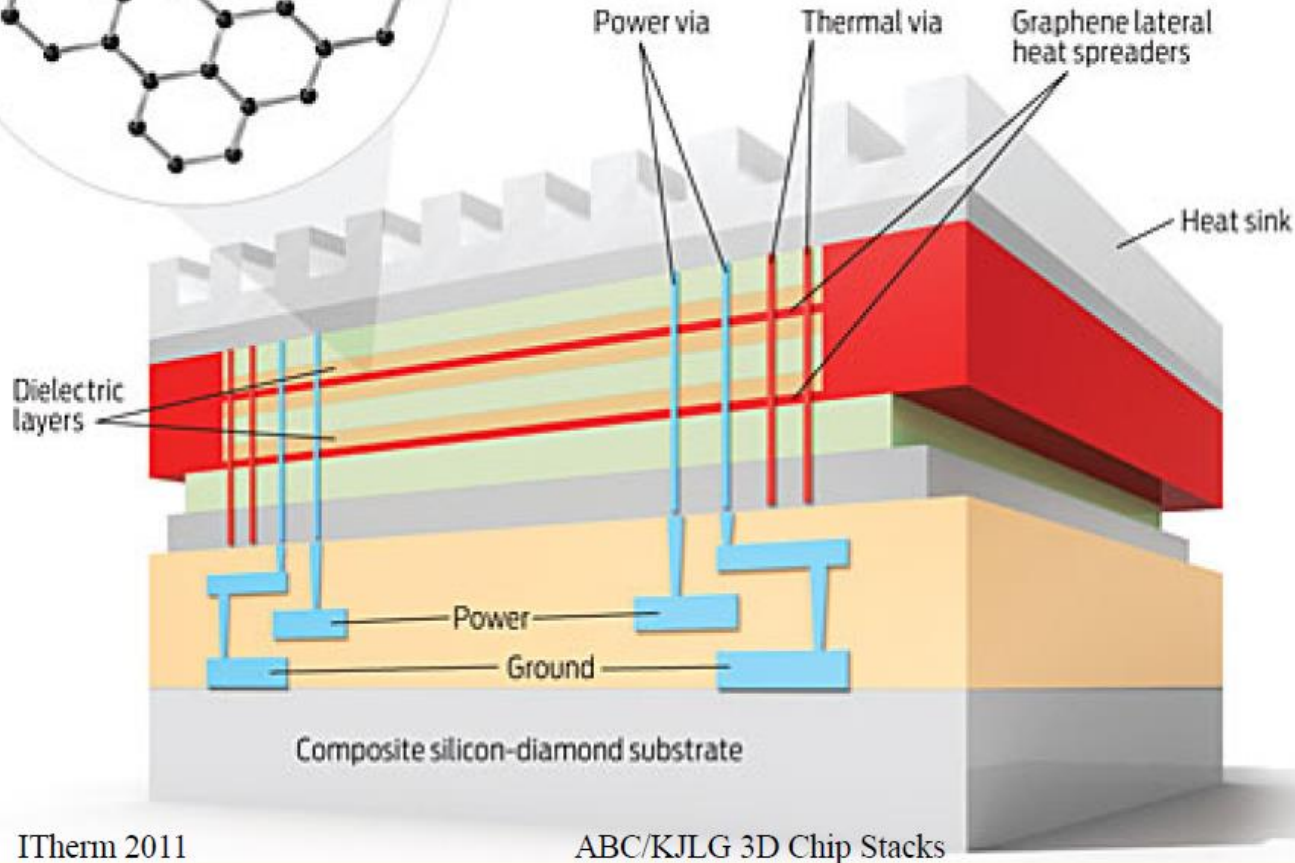
3D Packaging Configurations

Technology & z-Interconnect	Module	Application
Die Stacking (ChipPAC) Wire Bond		<ul style="list-style-type: none"> ▶ Memory ▶ ASIC + Memory
Package Stacking (ChipPAC) Wire Bond		<ul style="list-style-type: none"> ▶ Memory ▶ ASIC + Memory
Die Stacking (ChipPAC) Flip Chip		<ul style="list-style-type: none"> ▶ ASIC + other
Package Stacking (Amkor) Solder Ball		<ul style="list-style-type: none"> ▶ Memory
Folded Stacking (Tessera) Substrate + Solder Ball		<ul style="list-style-type: none"> ▶ Memory ▶ ASIC + Memory



Возможные технологии интегральных сборок с воздушным микроканальным охлаждением

3D Thermal Interconnect



(Balandin, 2009)

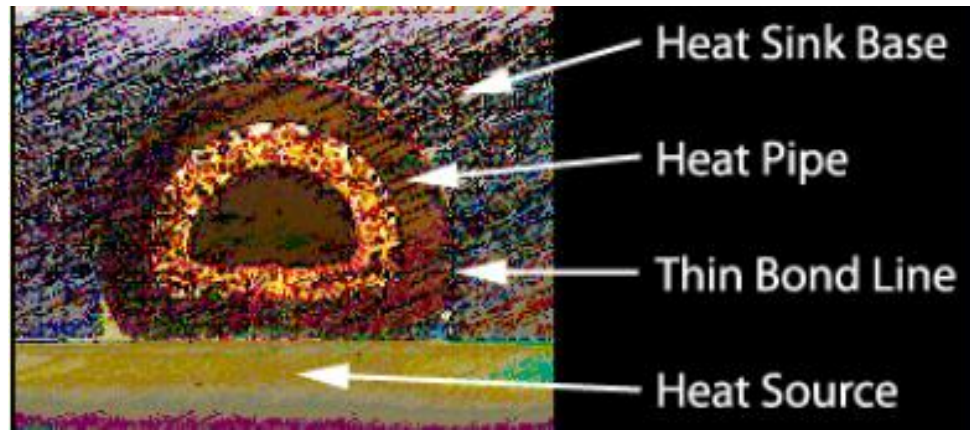
ITherm 2011

ABC/KJLG 3D Chip Stacks

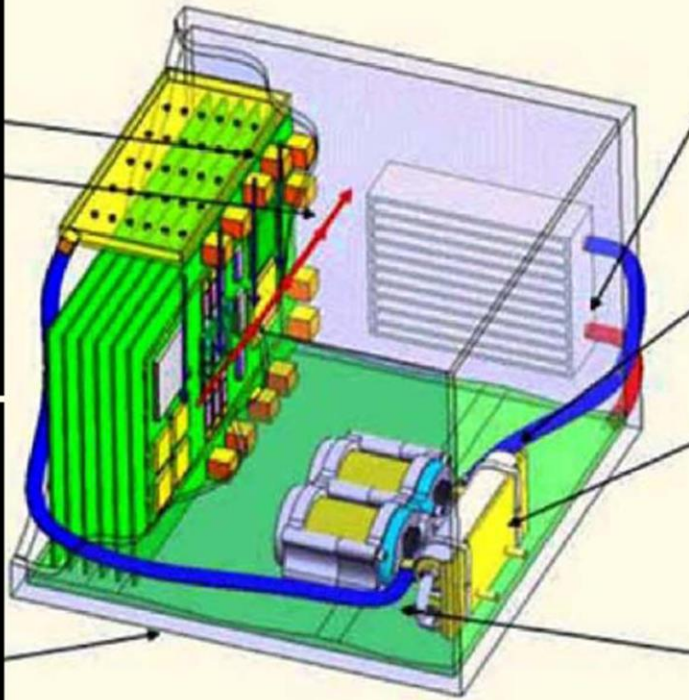
31

**Возможные технологии 3D интегральных
сборок с графеновыми ТИМ**

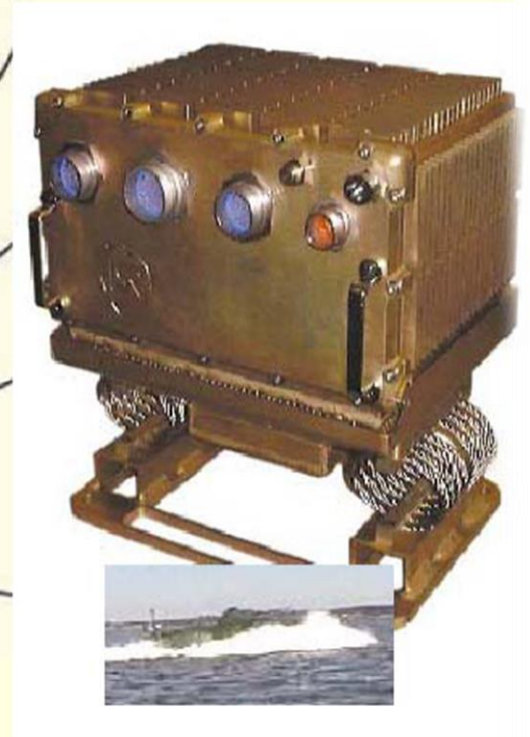
ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ КАК СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ



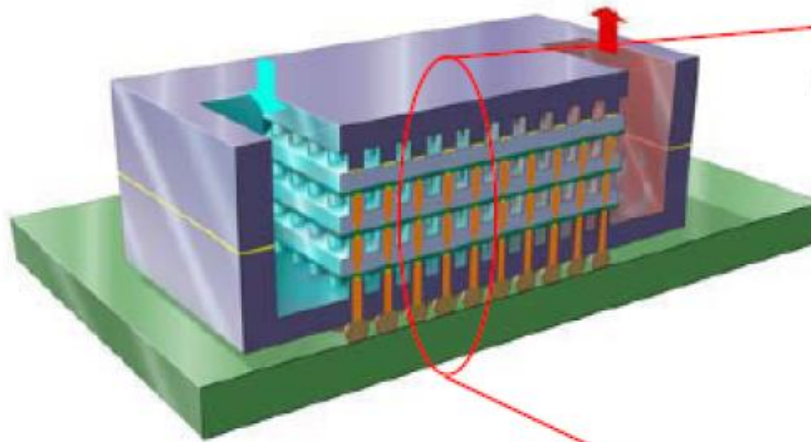
СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ КАПЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ



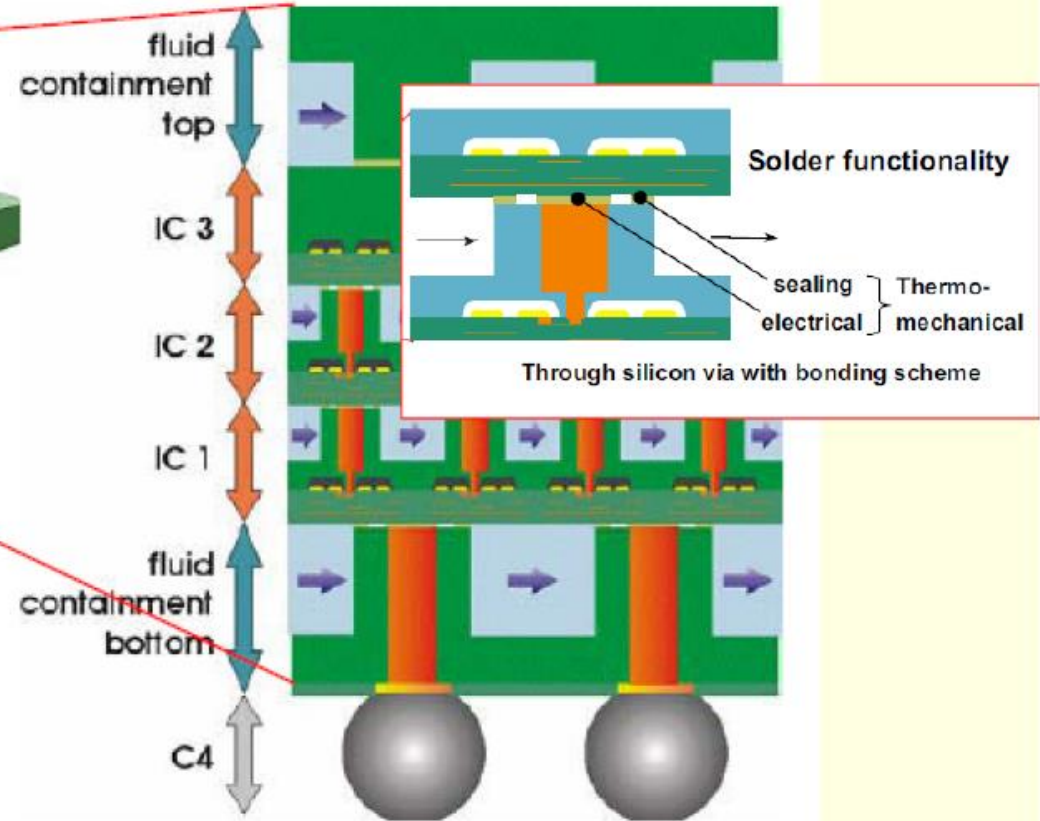
ABC/KJLG Hot Spots & 3D



ОХЛАЖДЕНИЕ 3D ЧИПОВ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ МИКРОКАНАЛОВ



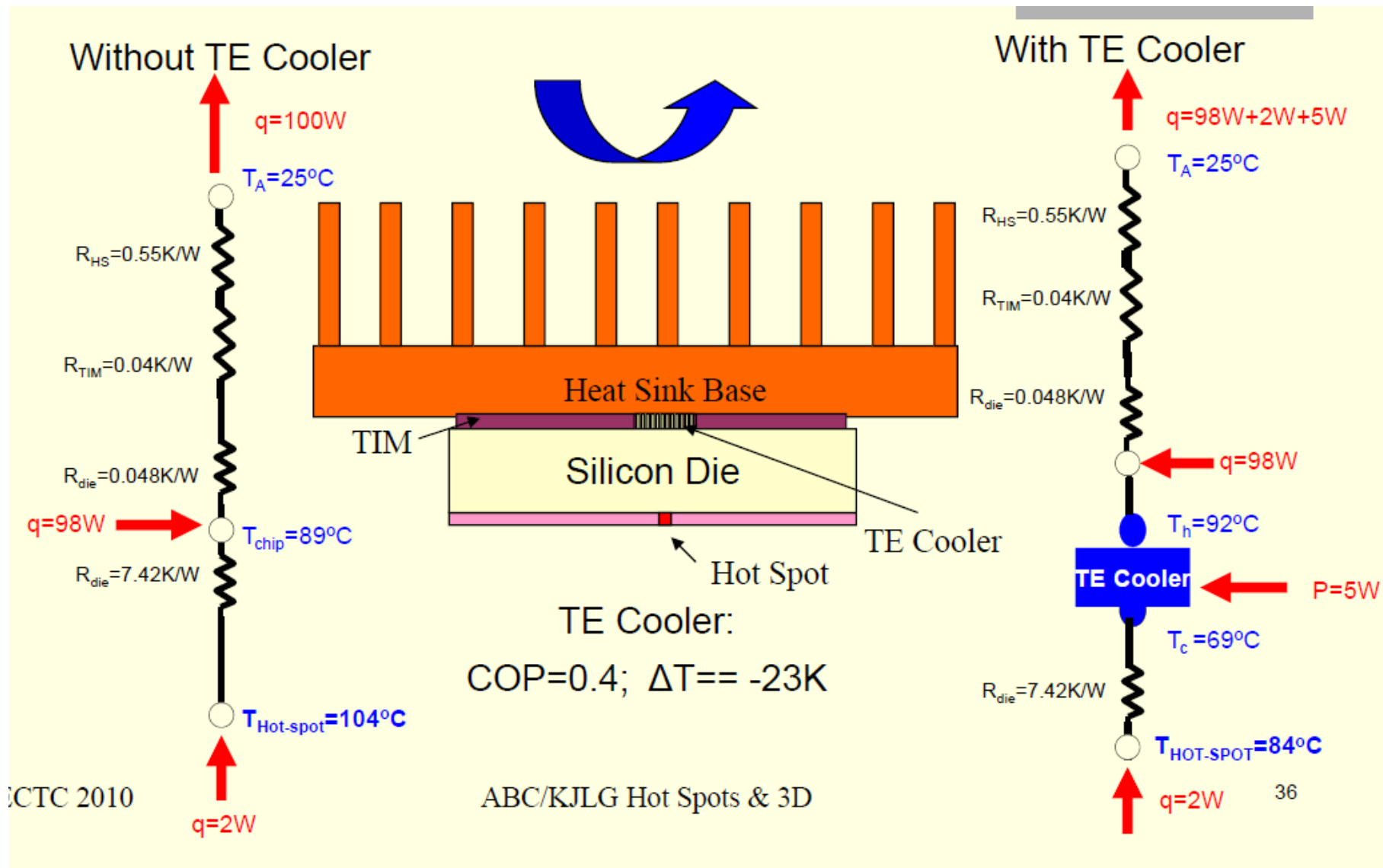
Система представляет собой сильно разветвленную систему микроканалов с охлаждающей жидкостью или двухфазным потоком внутри 3D интегрированной структуре чипов



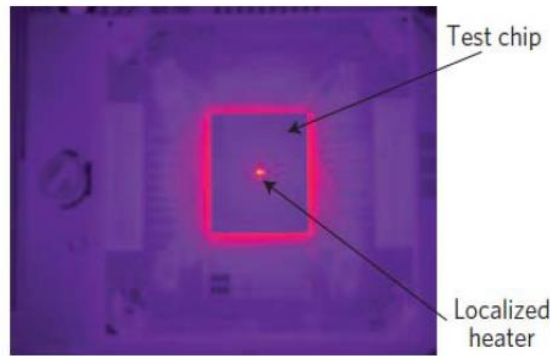
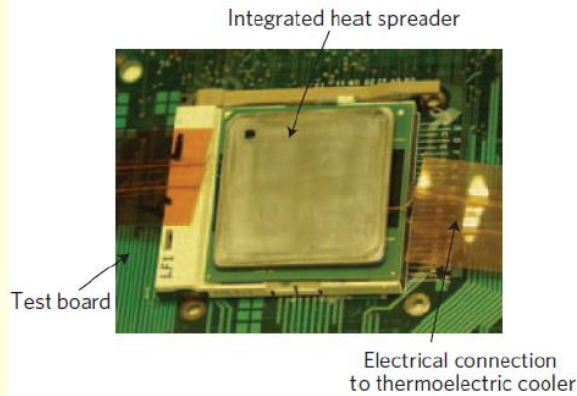
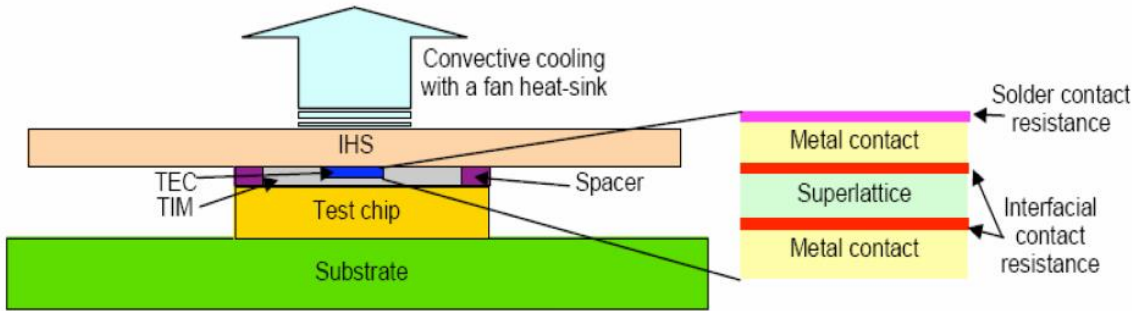
ABC/KJLG 3D Chip Stacks

(Brunschwiler et al., 2008)

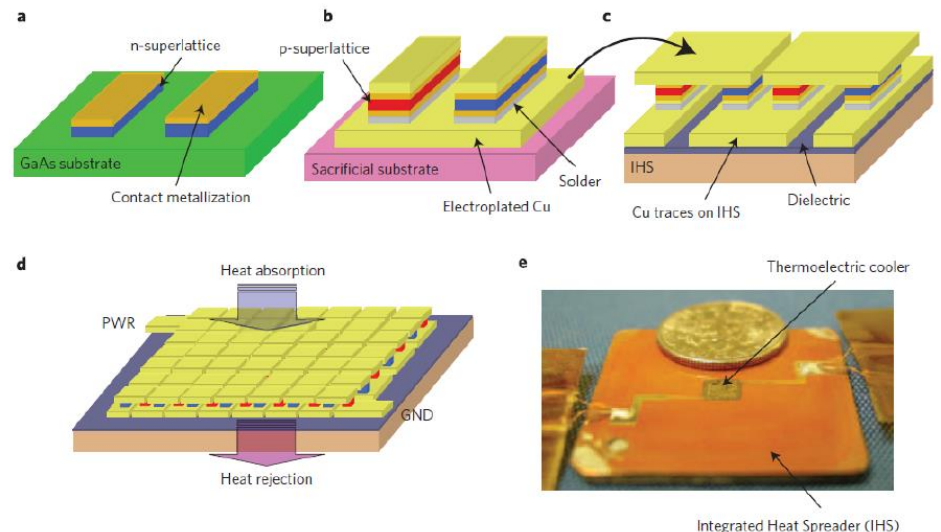
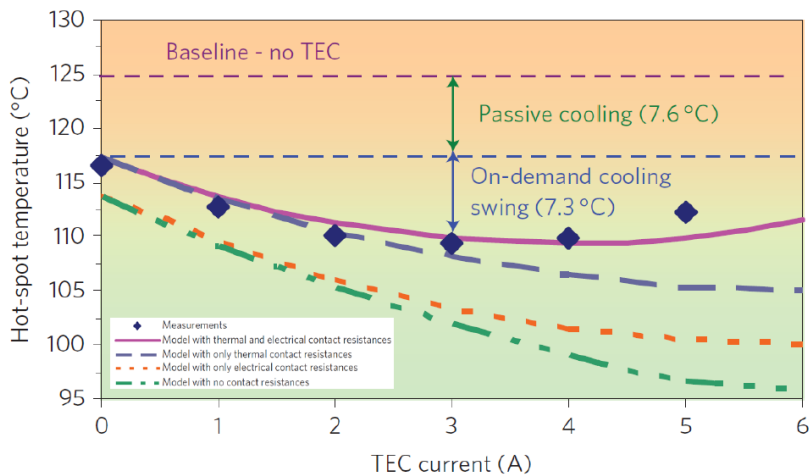
СИСТЕМЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК



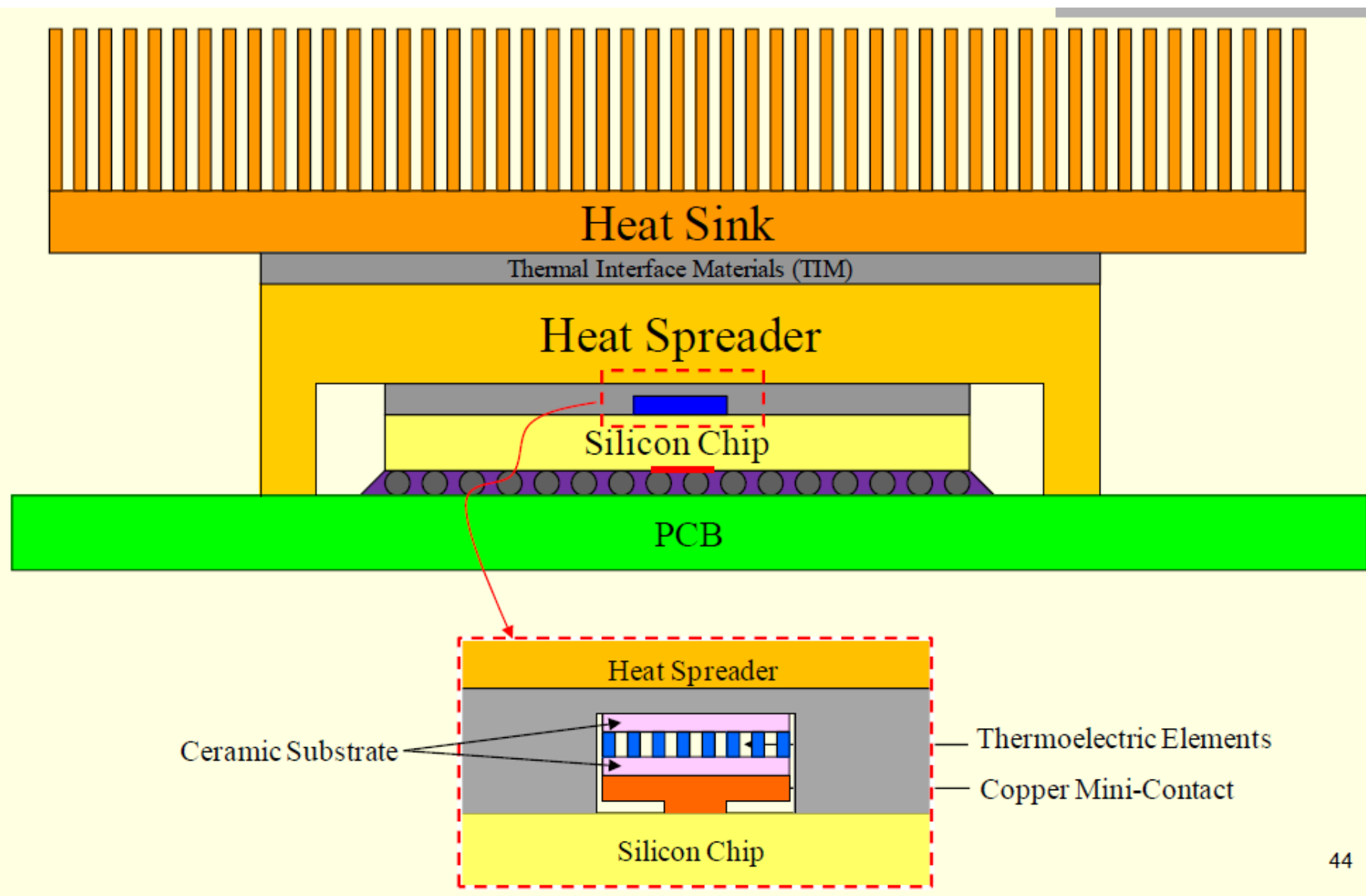
СИСТЕМЫ ТЭ ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК



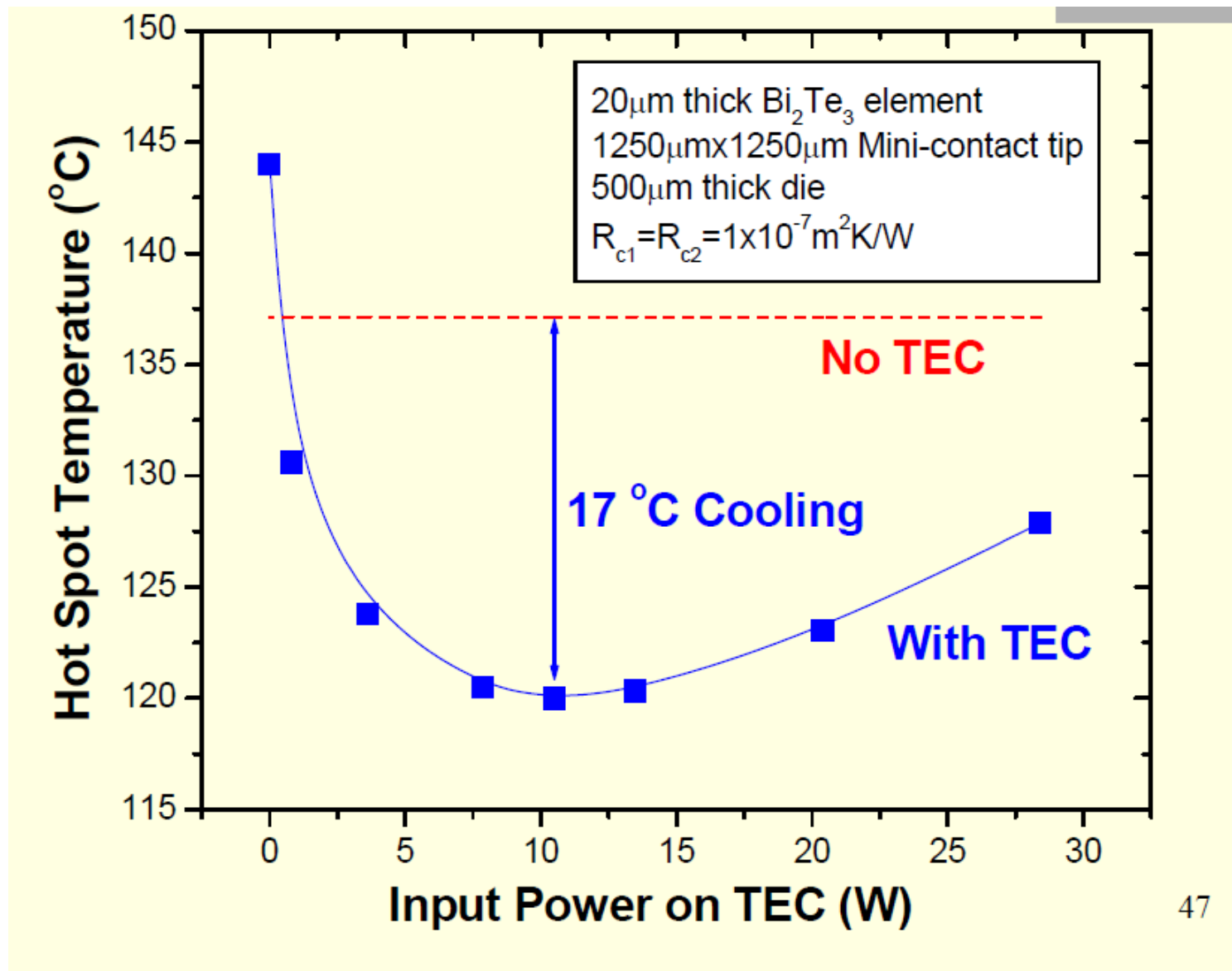
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХРЕШЕТОК



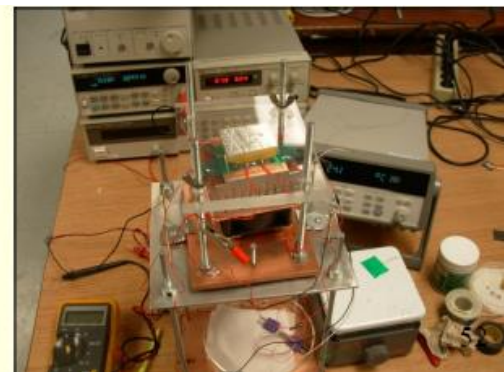
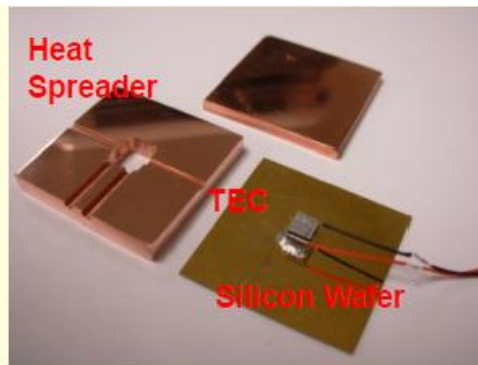
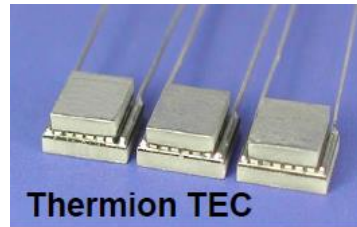
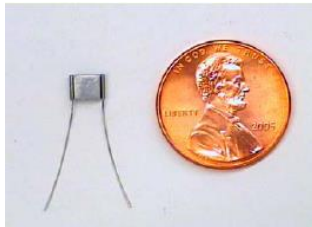
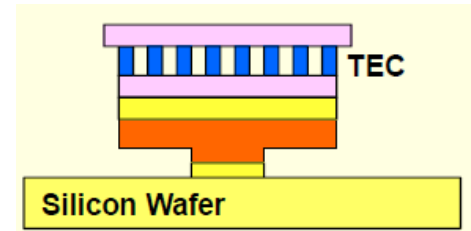
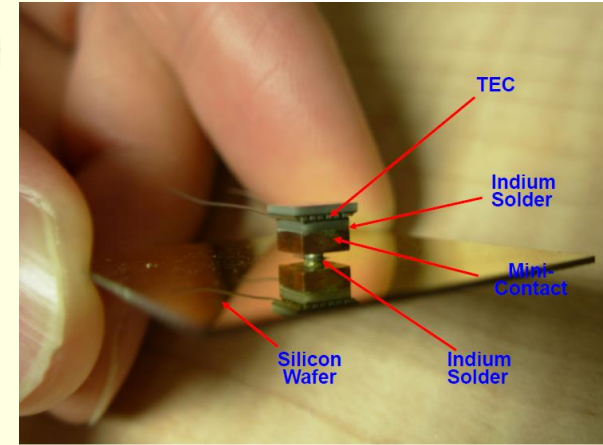
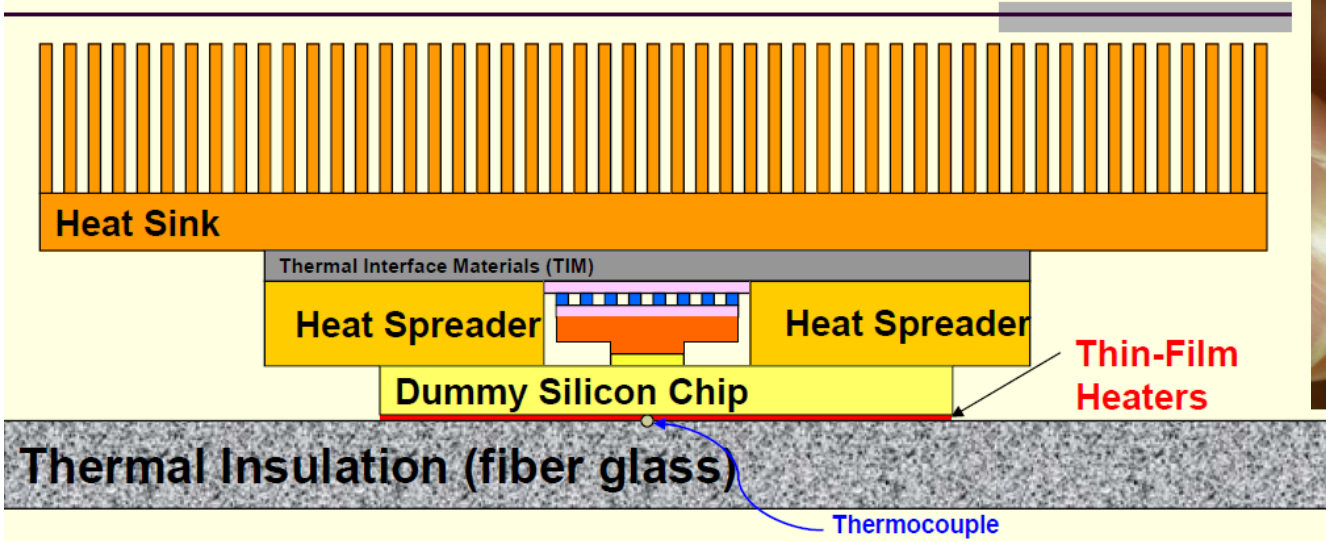
СИСТЕМЫ ТЭ ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК



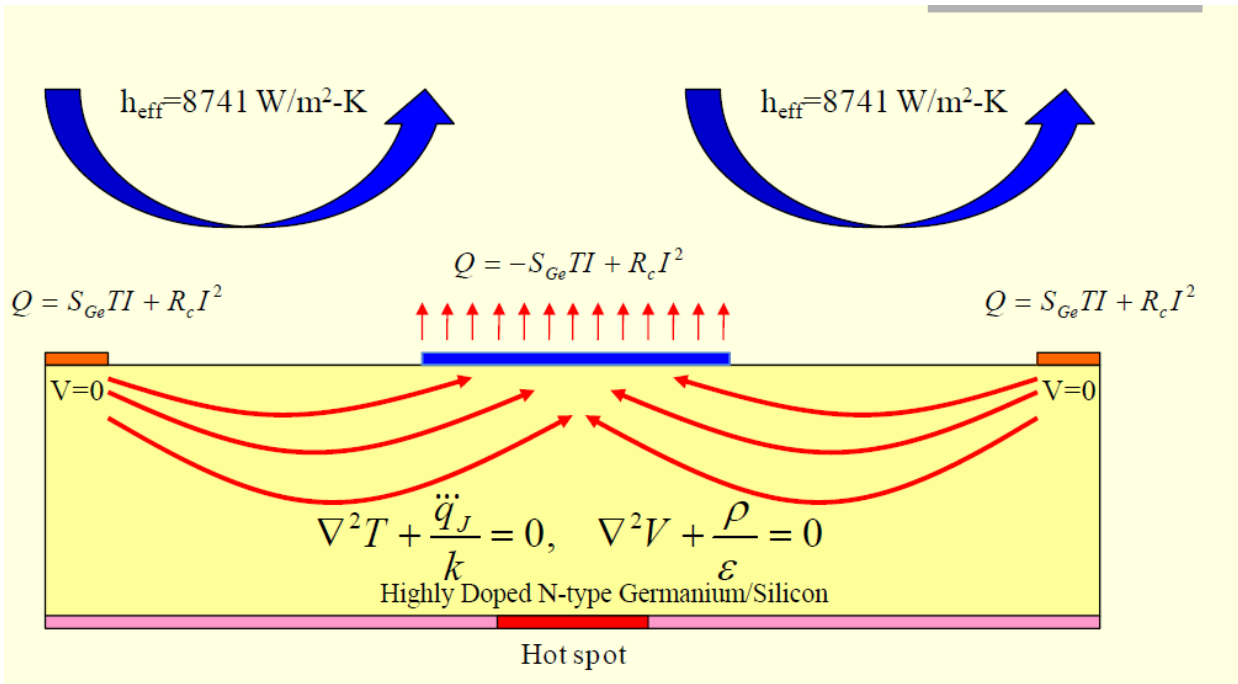
СИСТЕМЫ ТЭ ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК



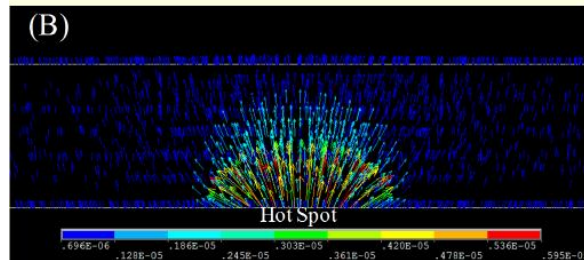
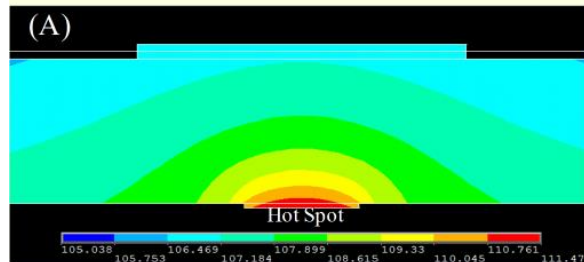
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СИСТЕМЫ ТЭО



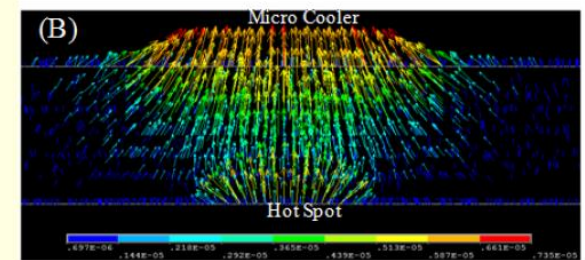
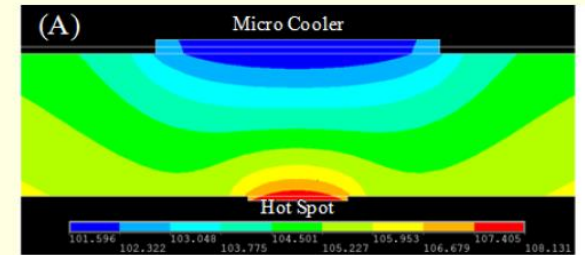
Система самоохлаждения Ge/Si



No Self-Cooling ($I = 0\text{A}$)



Self-Cooling ($I = 0.8\text{A}$)



ГРАНИЧНОЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЕ В НАНОСТРУКТУРАХ И ПРОБЛЕМА ТЕРМОИНТЕРФЕЙСОВ

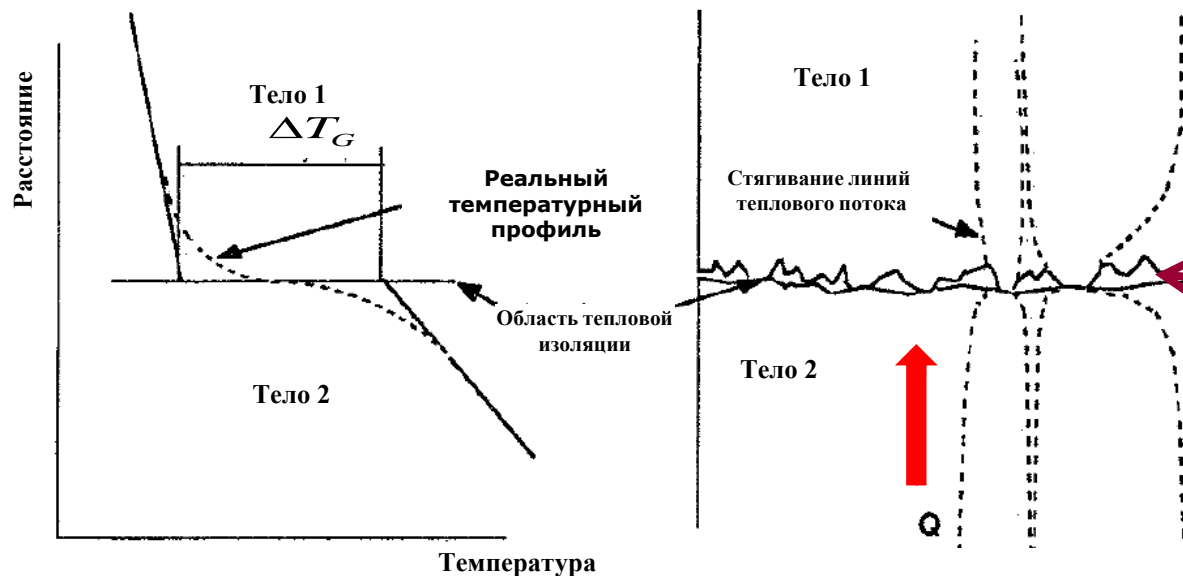


Схема возникновения термического граничного сопротивления на интерфейсе двух материалов

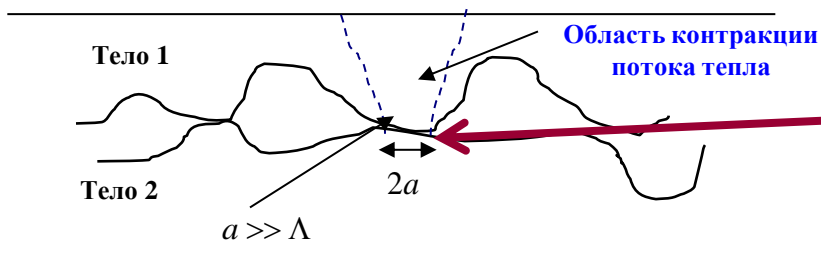
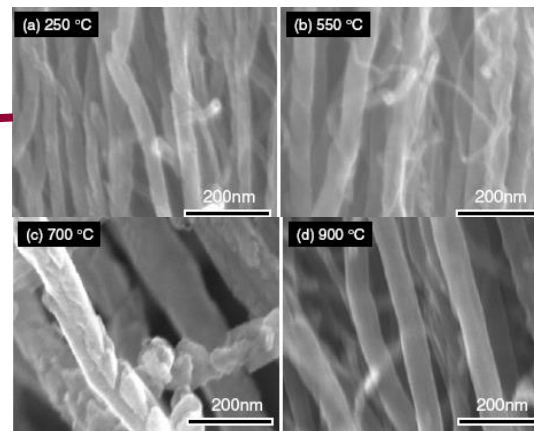
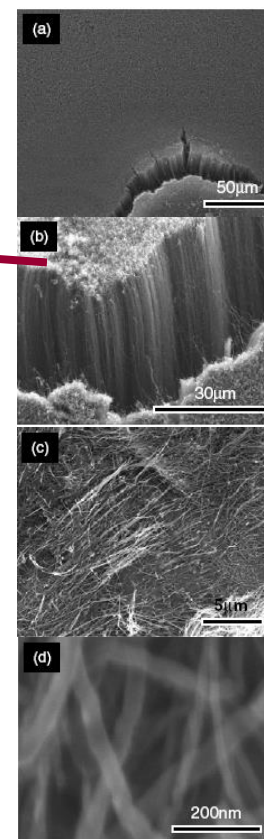
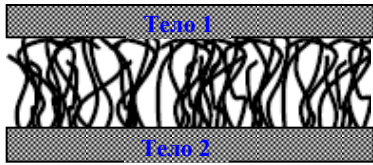


Схема баллистического механизма граничного термосопротивления

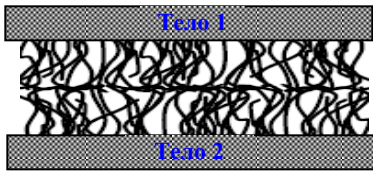


Леса нанопроволок и нанотрубок в контакте с объемным телом

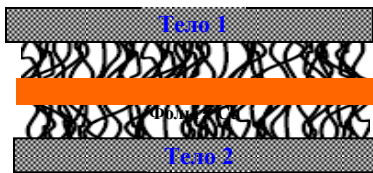
Виды термических интерфейсов в наноструктурах



Термический интерфейс – две наноповерхности

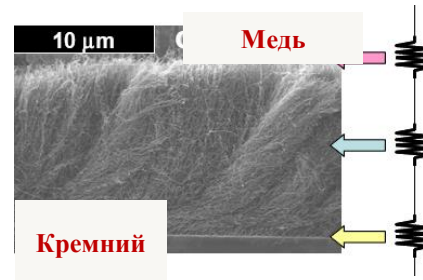


Термический интерфейс – три наноповерхности

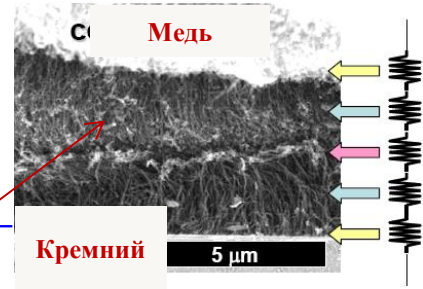


Термический интерфейс – пять наноповерхностей

Фольга Cu

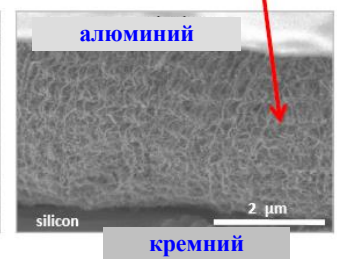
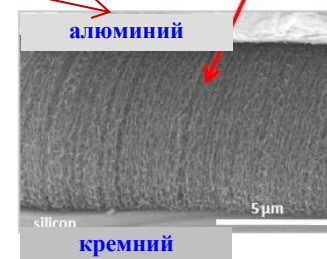
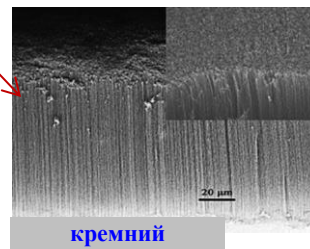
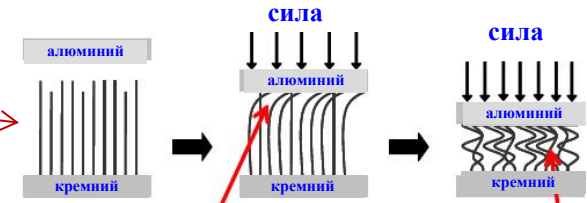


Термический интерфейс – три наноповерхности – три типа термосопротивления

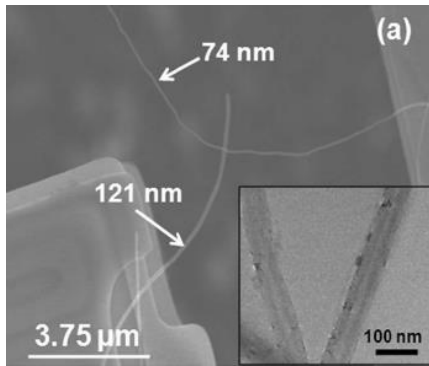


Термический интерфейс – пять наноповерхностей – пять типов термосопротивлений

Деформируемые термические интерфейсы – реальные наноповерхности с измененными термосопротивлениями



Схемы контактных сопротивлений в различных вариантах клубков и пеллет нанотрубок



Кросс-пересечения многостенных углеродных нанотрубок

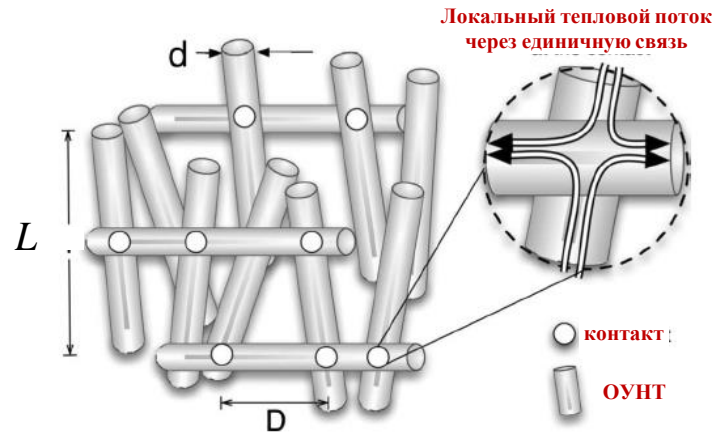
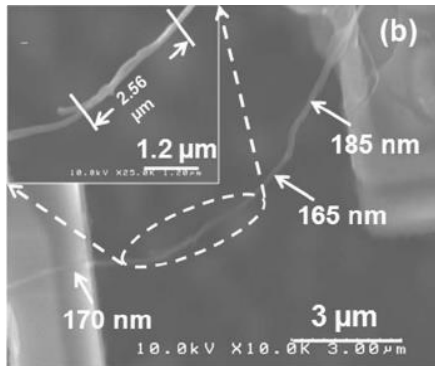
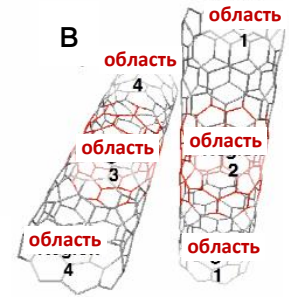
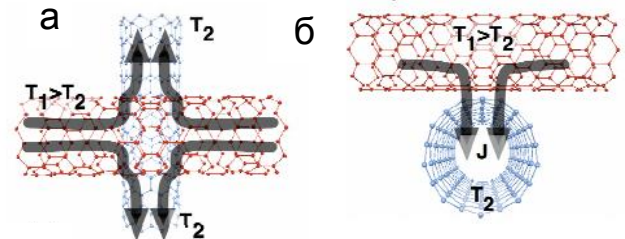
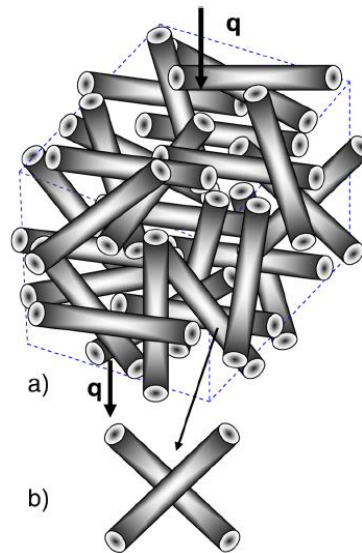
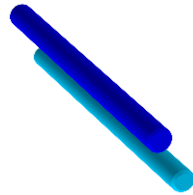


Схема пеллеты из одностенных углеродных нанотрубок

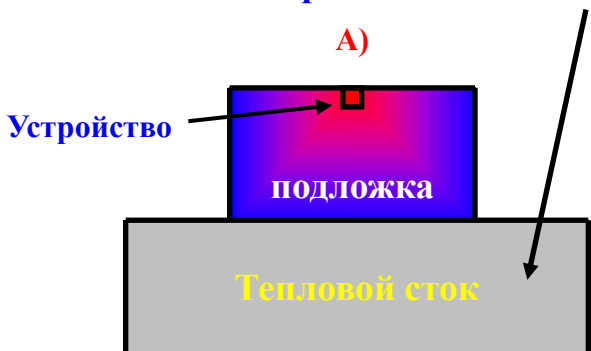


Параллельные пересечения многостенных углеродных нанотрубок

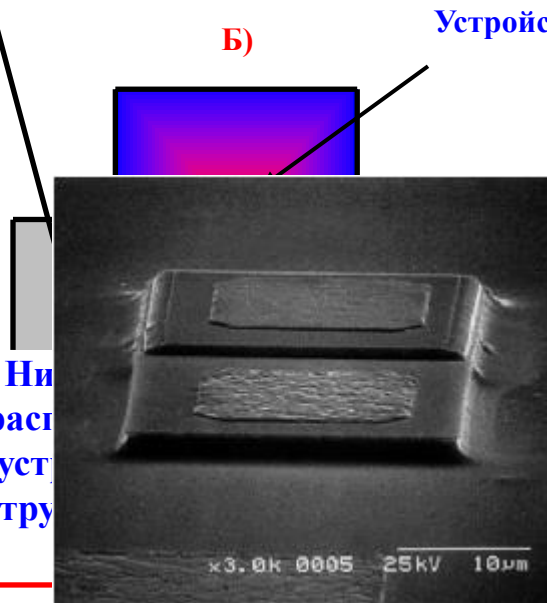


5. Термоменеджмент и перспективные задачи нанофооники (термодиоды, термотранзисторы и т.п.)

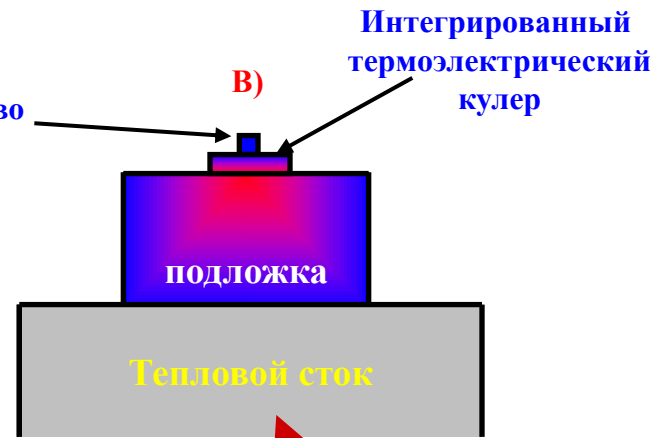
Большой теплосток неэффективен при охлаждении микроскопических «горячих точек»



Верхнее крепление (трудности в отводе тепла)



Нижнее крепление (трудности в отводе тепла)



Интегрированные системы охлаждения



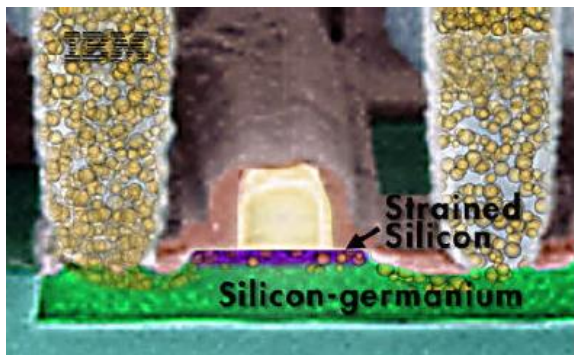
p-i-n диод

ТЭ-кулер

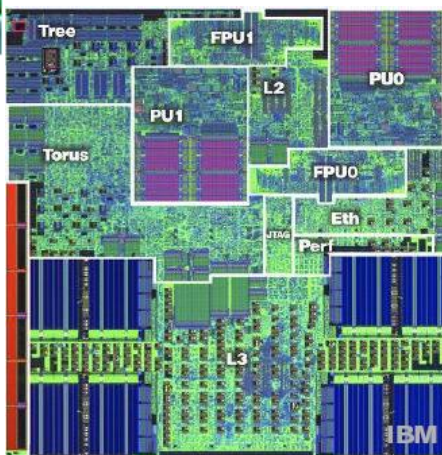
Термоменеджмент – управление тепловыми процессами в микро- и наноструктурах и устройствах

Thermal Management Methods

Охлаждение на транзисторном уровне (электротермическое конструирование)

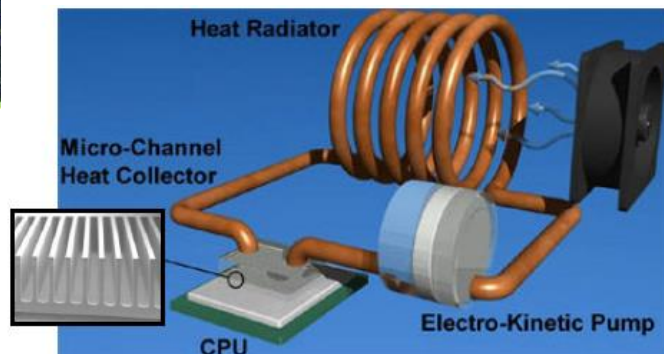


10-100 нм



1 – 100 мкм

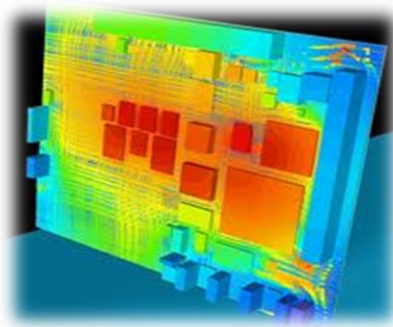
Охлаждение на уровне интегральной схемы (активное энергосбережение)



Системный уровень – активное микроканальное охлаждение

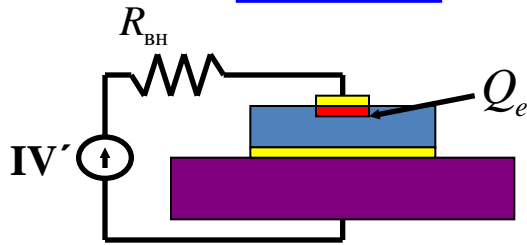
0,1 – 10 мм

Пространственные масштабы



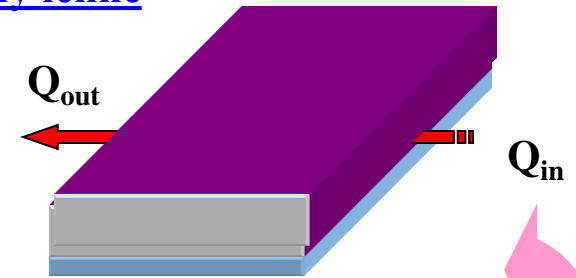
МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И ТЕРМОМЕНЕДЖМЕНТ

Диссипация электрической мощности



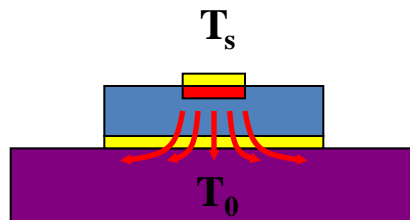
$$Q_e = IV = IV' - I^2 R_{\text{ВН}}$$

Тепловое излучение



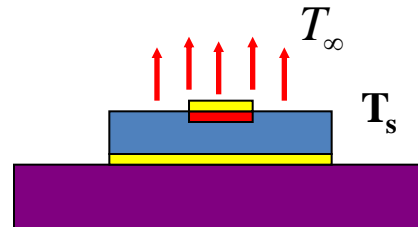
$$Q_{\text{изл}} = Q_{\text{out}} - Q_{\text{in}}$$

Теплопроводность



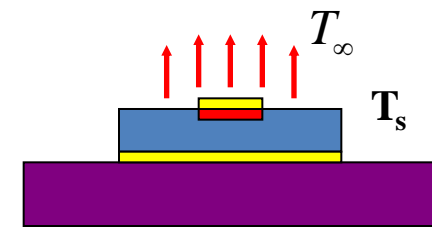
$$Q_T = \lambda(T_s - T_0) / L_T$$

Конвекция



$$Q_{\text{конв}} = S_{\text{eff}} \alpha (T_s - T_{\infty})$$

Излучение



$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon \sigma_{\text{SB}} (T_s^4 - T_{\infty}^4)$$

Таким образом, имеем

$$Q_e = IV = \lambda(T_s - T_0) / L_T + S_{\text{eff}} \alpha (T_s - T_{\infty}) + Q_{\text{изл}}$$

Можно измерить величины:

- T_{∞}, T_s, T_0 (например, микротермопарами)
- I, V – ток и напряжение



Нанофооника, тепловые диоды и транзисторы

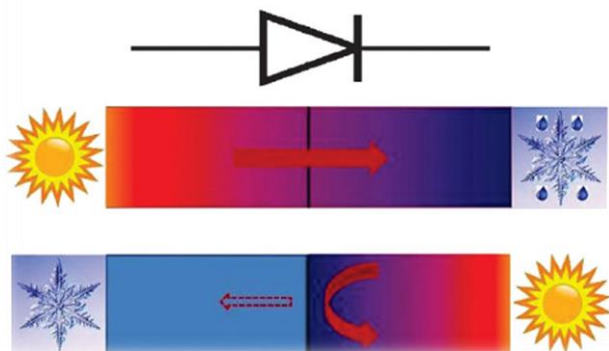
НАНОЭЛЕКТРОНИКА \longrightarrow НАНОФОТОНИКА \longrightarrow НАНОФОНОНИКА...

Тепловые колебания кристаллической решетки – фононы – обычно рассматриваются как тепловой шум в микро- и наноэлектронных и оптоэлектронных устройствах, поскольку они (фононы) мешают приему и обработке любой информации, процессам кодирования, записи и считывания.

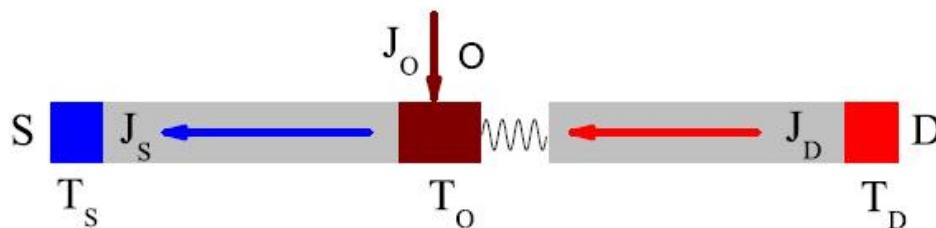
Если можно контролировать и управлять фононным переносом тепла, то можно создавать устройства, аналогичные электронным – тепловые диоды, транзисторы, тепловые логические элементы, элементы тепловой памяти.

Таким образом, вместо «электрического» привода в микро- и наноэлектронике, можно использовать низкопотенциальное («бросовое») тепло в окружающем мире. Кроме того, большинство хорошо известных электронных и электронно-дырочных явлений (эффект Холла, эффекты геометрической фазы, и т.п.) могут быть реализованы на базе тепла (потока фононов в конденсированном теле или в молекулярных цепочках, как в молекулярной электронике)

ТЕРМИЧЕСКИЙ ДИОД



Термический транзистор



G. Casati. CHAOS. 15. 015120.2005.
Controlling the heat flow: Now it is possible

Термический фононный диод

Варианты термического диода

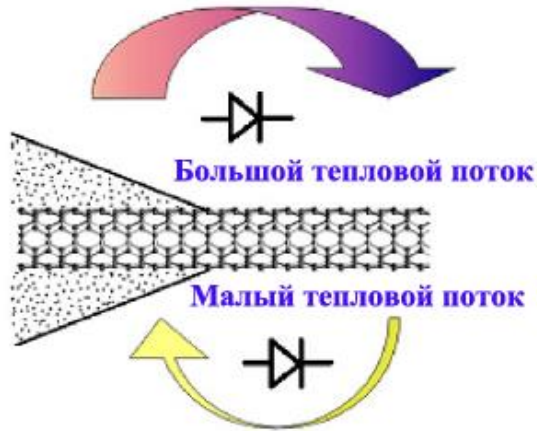
1. Двухсегментый термодиод

2. Термодиод на асимметричном сопротивлении Капицы

Варианты термического транзистора

1. Отрицательное дифференциальное теплосоппротивление,

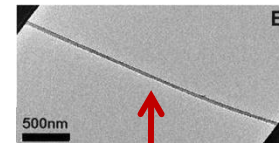
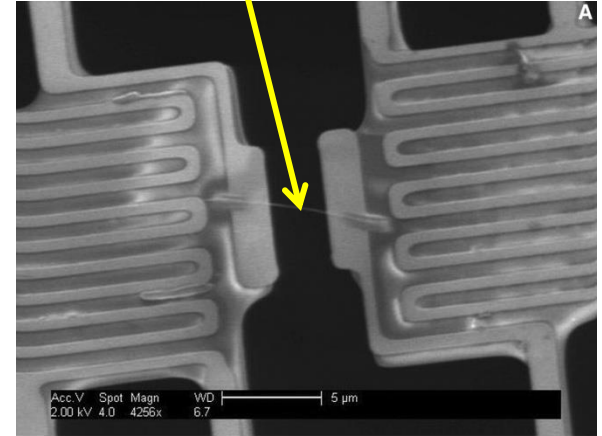
2. ...???



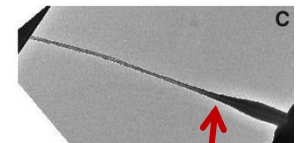
Если правая сторона нагрета до более высокой температуры, чем левая, тепловой поток направлен слева направо.

Если левая сторона нагрета до более высокой температуры, до дополнительное термическое сопротивление сильно снижает тепловой поток по сравнению с первым случаем – отсюда возможность термодиода на углеродных нанотрубках, покрытых частично слоем теплоизолятора.

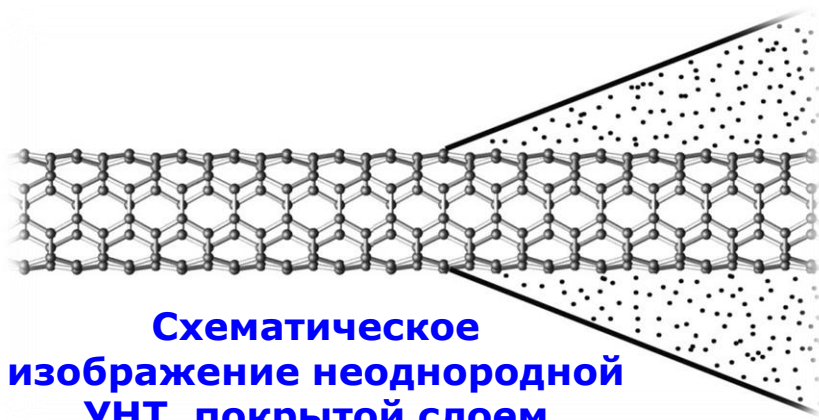
УНТ



Однородная
УНТ



Неоднородная
УНТ

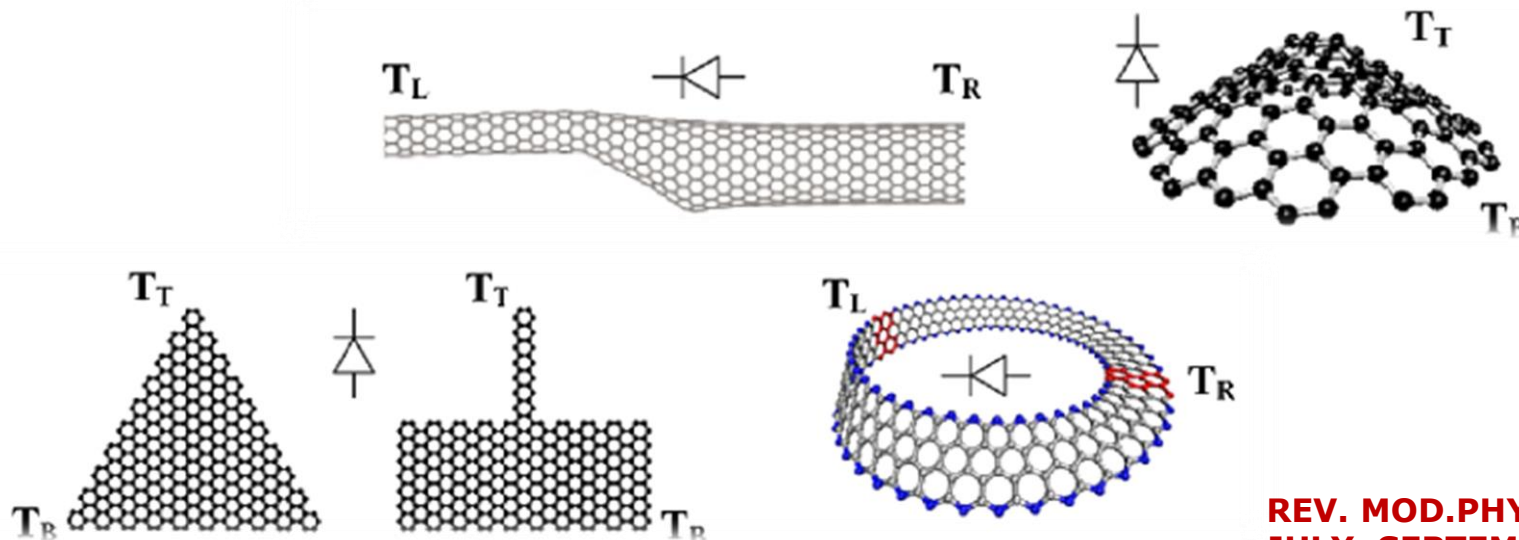


Схематическое изображение неоднородной УНТ, покрытой слоем аморфного $C_9H_{16}Pt$

Chang C., Okawa D., Majumdar A., Zettl A. 2006. Solid-State Thermal Rectifier. Science 314, 1121.

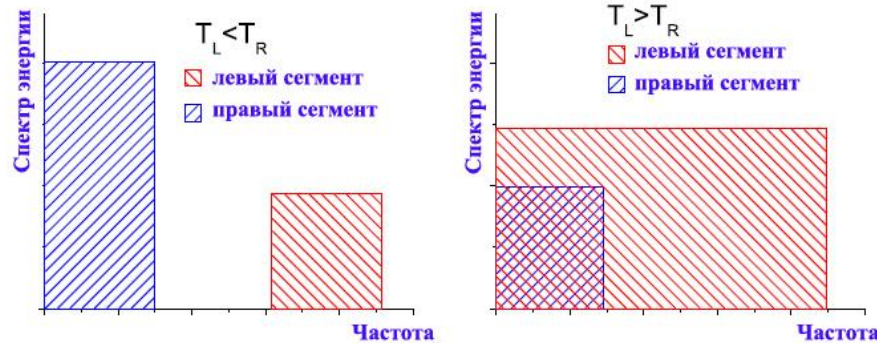
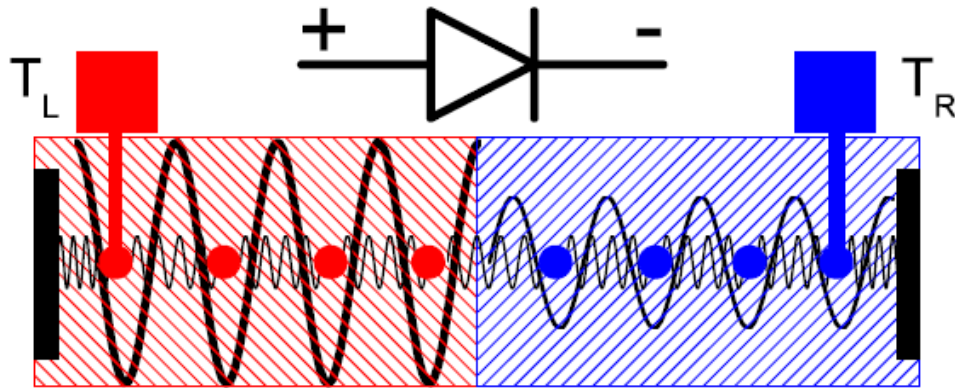
Продемонстрирован экспериментально эффект наноразмерной структуры на основе УНТ с неоднородным вдоль ее оси покрытием $C_9H_{16}Pt$ для создания наноразмерного твердотельного теплового выпрямителя. Полученная наноразмерная система дает асимметричную осевую теплопроводность с большим тепловым потоком в сторону уменьшения массовой плотности покрытия. Эффект не может быть объяснено обычными пертурбативными волновыми теориями, но может быть следствием возникновения тепловых солитонов в такой структуре. вместо этого мы предполагаем, что солитоны могут быть ответственны за это явление. Тепловые выпрямители могут иметь существенные последствия для разнообразных задач теплового управления, начиная от наноразмерных калориметров для микроэлектронных процессоров до макроскопических холодильников и энергосберегающих систем

Схемы неоднородных углеродных наноструктур для потенциальных термических додов



REV. MOD. PHYS. VOL. 84, JULY-SEPTEMBER 2012.

Двухсегментный термодиод



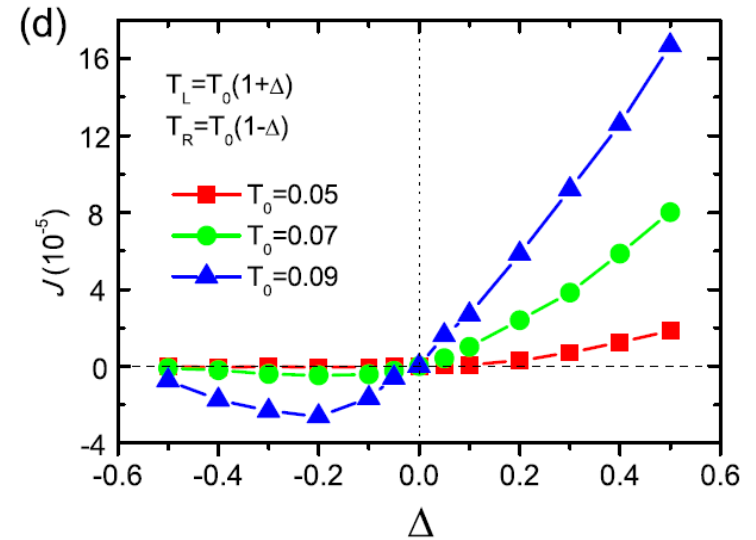
Пример термодиода, состоящего из двух цепочек Конторовой – Френкеля: левый сегмент состоит из нелинейных сильно взаимодействующих частиц, правый – из слабо взаимодействующих.

Если $T_L < T_R$ спектр мощности частиц имеет больший вес при больших частотах.

Если $T_L > T_R$ спектр мощности частиц имеет больший вес при малых частотах.

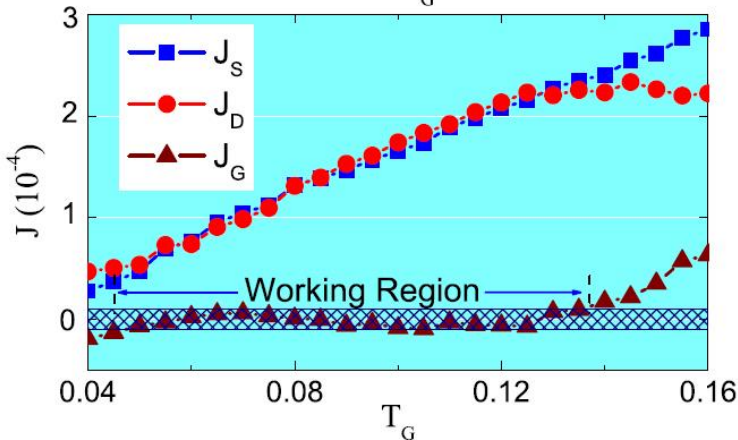
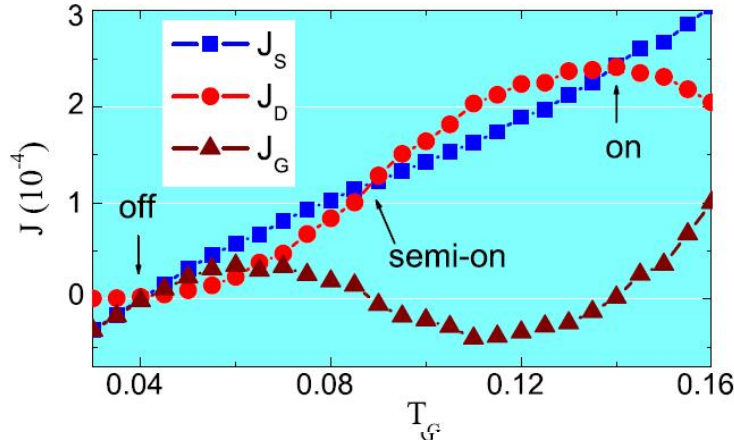
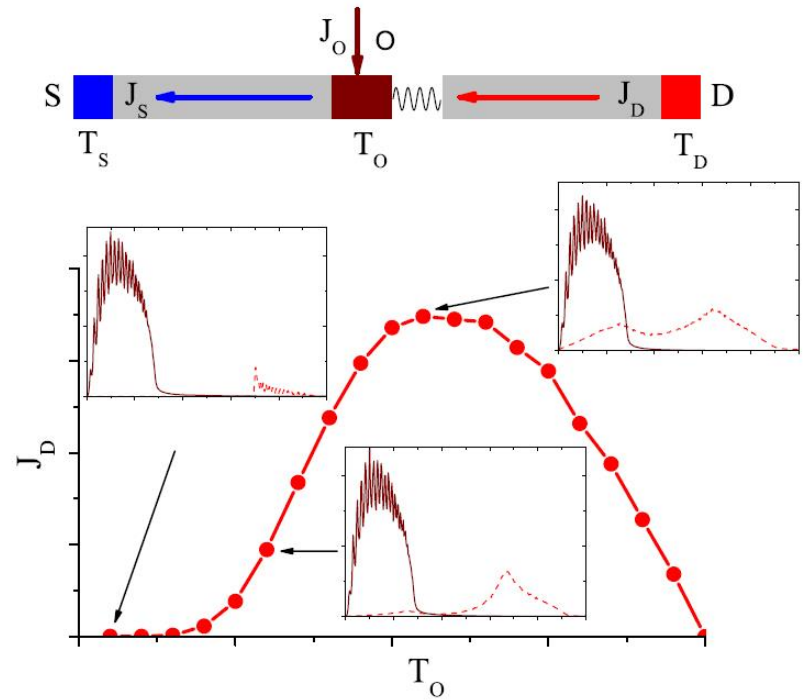
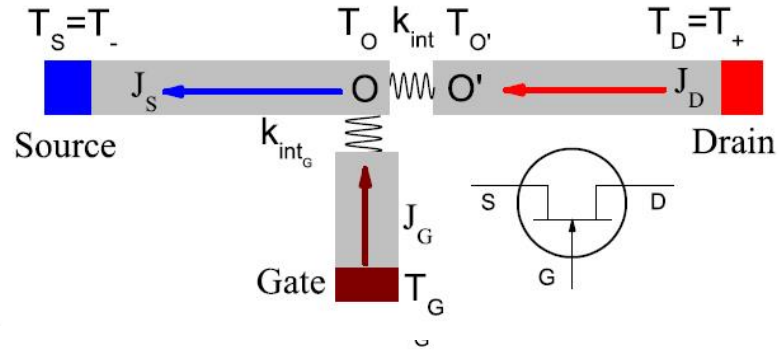
Модель Конторовой -Френкеля

$$H = \sum_{i=1}^N \left[\frac{p_i^2}{2} + \frac{1}{2} (x_i - x_{i-1})^2 + \frac{V}{4\pi^2} [1 - \cos(2\pi x_i)] \right],$$



Тепловой поток J как функция разности температур Δ имеет различный вид, в зависимости от температуры T_0

Термический фононный транзистор (варианты)



$$T_D > T_S; T_S < T_0 < T_D$$

k_{int}, k_{int_G} – теплопроводности

между резервуарами D, S и G

Схемы расчета тепловых транзисторов очень схожа со схемой расчета обычных электронных транзисторов !!!

6. Что дальше – энергетика и наноэнергетика на основе «бросового» тепла?

ИСТОЧНИКИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА

ЖИЛЫЕ ДОМА
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ
ПОМЕЩЕНИЯ
ОФИСЫ



СОЛНЕЧНАЯ ТЕПЛОТА



МУСОР И
ТВЕРДЫЕ
БЫТОВЫЕ
ОТХОДЫ

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА
КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ



ДАТА-ЦЕНТРЫ
КОМПЬЮТЕРЫ
МОНИТОРЫ
СИСТЕМЫ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

ЧТО ДЕЛАТЬ С
НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫМ
ТЕПЛОМ?



ТЕПЛОВЫЕ
ПУНКТЫ
СИСТЕМЫ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ



СИСТЕМЫ
СУШКИ



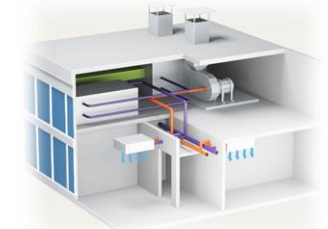
И еще теплота земли,
суши и океанов!!!



АГРОКОМПЛЕКСЫ

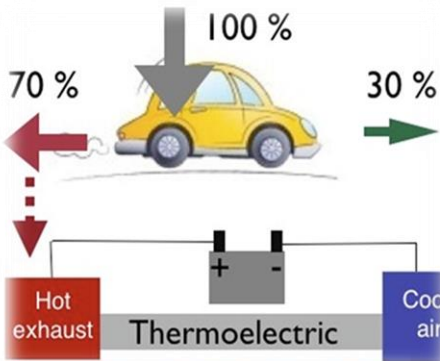


ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ
СТАНЦИИ



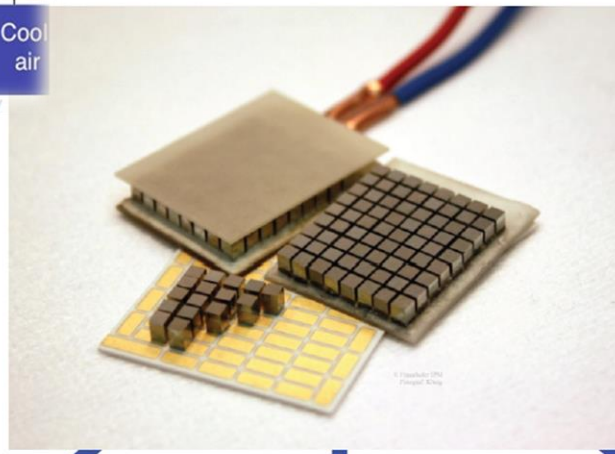
КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ
И ВЕНТИЛЯЦИЯ

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ НА УТИЛИЗИРОВАННОМ ТЕПЛЕ



Picture Source: <http://www.nano.ith.edu/research/nano-energy/>

Использование в обычных системах сжигания топлива



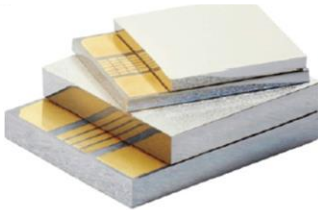
Высокотемпературные ТЭГ в системах нагрева



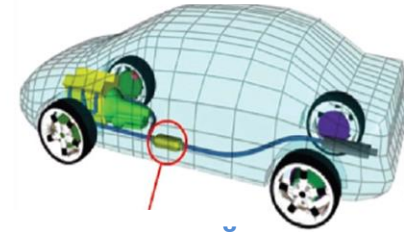
Отвод тепла в промышленных процессах



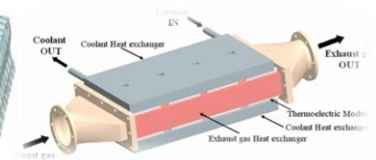
Беспроводные сенсоры



Отвод тепла в автомобилях



Каталитический конвертер



Современные приложения термоэлектрического преобразования энергии

waste heat recovery



autonomous systems



cooling / heating



Солнечные термоэлектрические генераторы (СТЭГи)

В настоящее время существует две базовых концепции использования солнечной энергии:

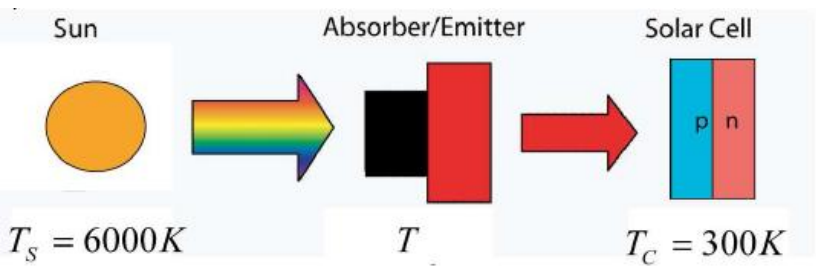
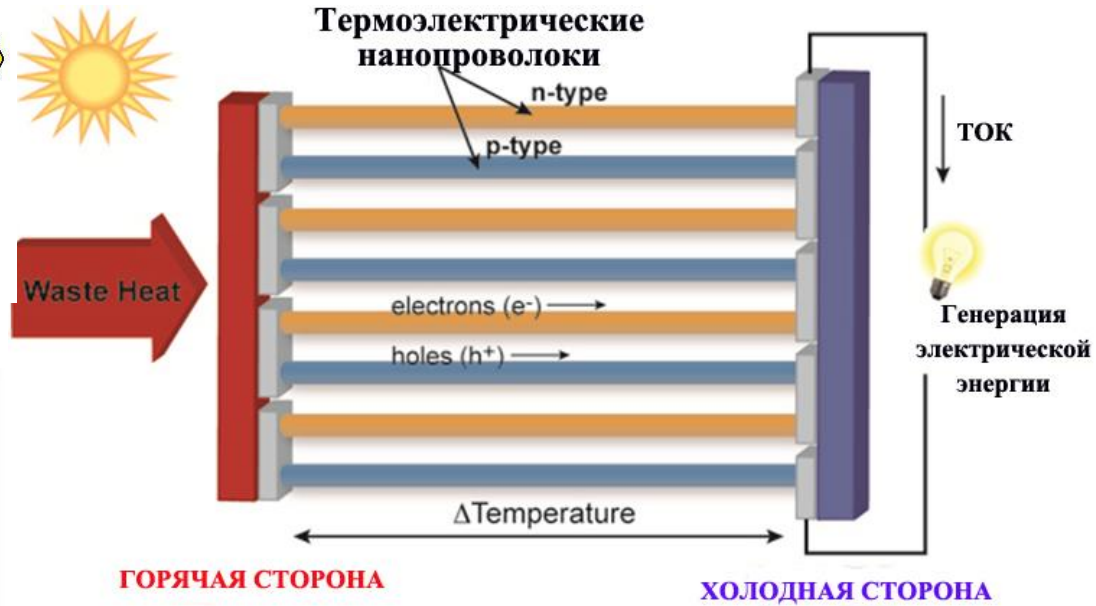
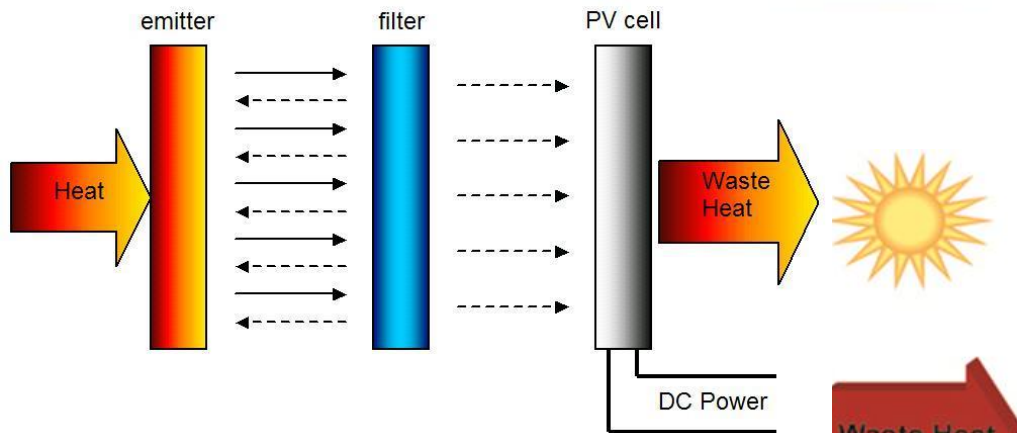
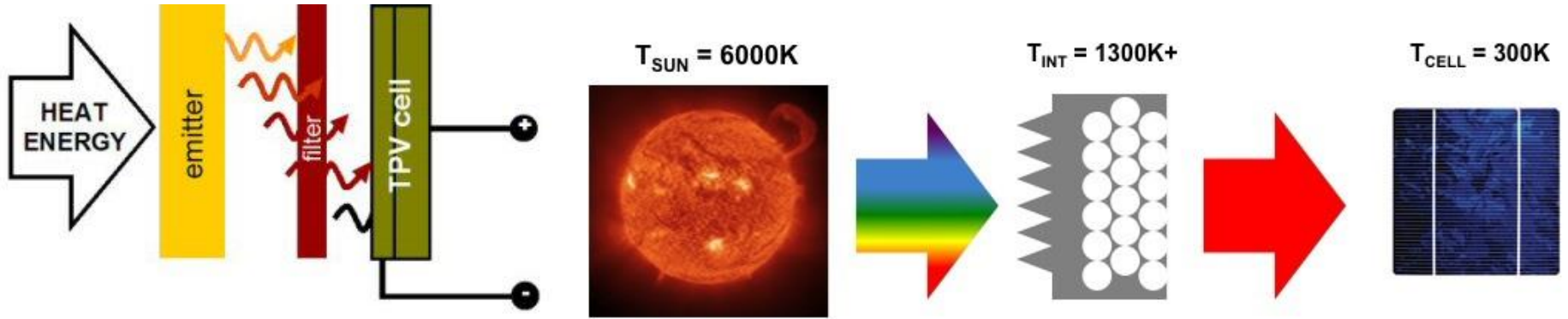
- солнечные фотоэлектрические (фотовольтаика);
- солнечные тепловые электростанции

В последнее время появился большой интерес к третьему типу солнечного преобразования энергии – солнечному термоэлектричеству. В этой технологии используются термоэлектрики, которые способны под действием градиента температуры вырабатывать электрический ток. Если такой материал находится между поглотителем солнечной энергии и теплоотводящим блоком, то в нем реализуется градиент температуры, который и приводит к генерации электрической энергии. Такие системы получили название солнечных термоэлектрических генераторов СТЭГ (solar thermoelectric generators (STEGs)).

Последний тип энергетических установок, аналогично солнечным тепловым электростанциям, могут использовать весь солнечный спектр излучения, а не только энергию фотонов, которая больше ширины запрещенной зоны в полупроводниковых фотоэлементах.

Преимущество СТЭГов состоит в том, что они, как и традиционные фотоэлектрические генераторы могут быть созданы для любых мощностей и в любых масштабах, не требуют термомеханических генераторов (например, турбин), как в солнечных тепловых электростанциях, т.е. являются системами твердотельного типа. Поскольку в СТЭГах нет механических движущихся частей, они являются существенно более надежными, простыми к эксплуатации и стоимость их функционирования значительно ниже, чем у традиционных систем преобразования энергии.

ТЕРМОФОТОВОЛЬТАИКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ



ПРЕДСКАЗАНИЯ

«Все, что можно изобрести, уже изобретено»

(Charles Duell, Head of US Patent Office, 1899)

«Мода на радио скоро умрет»

(Томас Эдиссон, изобретатель лампы накаливания, 1922)

«С точки зрения теории и техники, телевидение нереализуемо по коммерческим и финансовым причинам»

(Ли де Форест, изобретатель триода, 1926)

«Рынок компьютеров не превысит пяти штук»

(Томас Ватсон, глава IBM, 1943)

«Компьютер будущего не будет легче 1,5 тонн»

(Popular Mechanics Magazine, 1949)

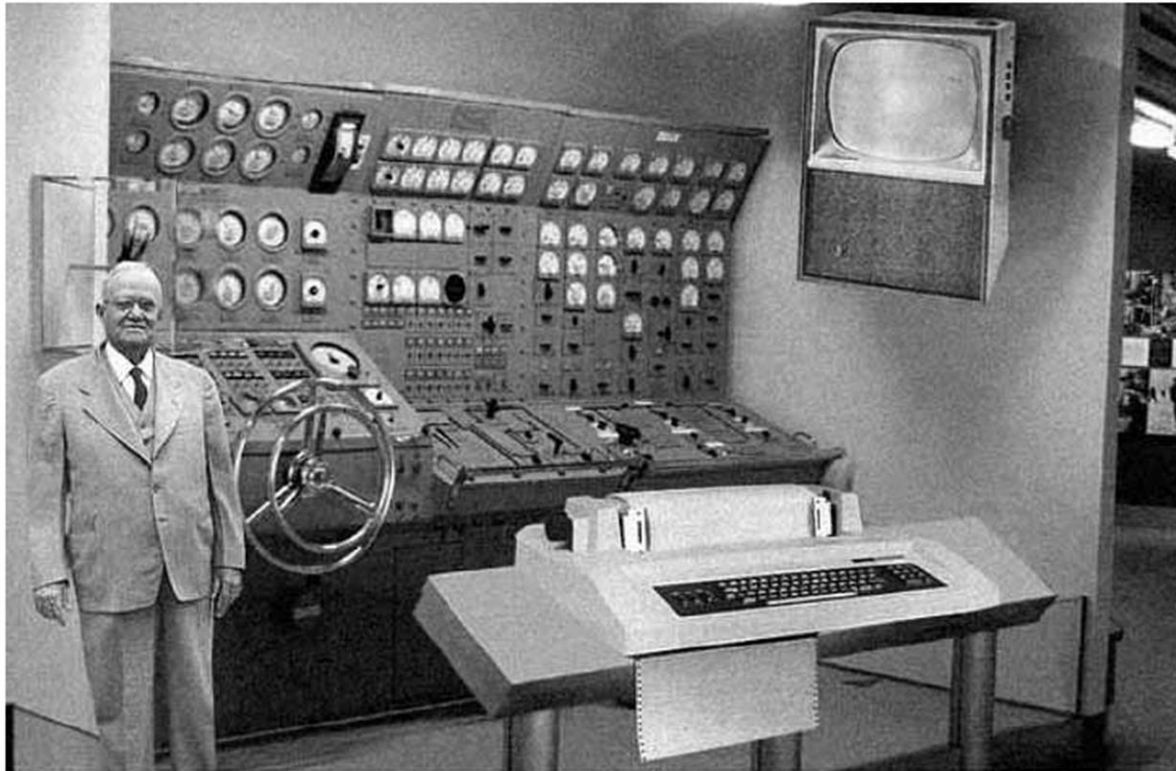
«Нет никакого смысла иметь кому-либо компьютер дома»

(Кен Ольсен, глава компании DEC, 1977)

«Память размером 640К будет достаточной для кого-либо»

(Билл Гейтс, Microsoft, 1981)

About predicting the future...



Scientists from the RAND Corporation have created this model to illustrate how a "home computer" could look like in the year 2004. However the needed technology will not be economically feasible for the average home. Also the scientists readily admit that the computer will require not yet invented technology to actually work, but 50 years from now scientific progress is expected to solve these problems. With teletype interface and the Fortran language, the computer will be easy to use.

In 1954, Popular Mechanics showed its readers what a home computer might look like in 2004.

RAND (Research And Development) Corporation, non-profit, founded in 1948

ЧТО ОСТАЛОСЬ ЗА БОРТОМ ЭТОЙ ЛЕКЦИИ:

- Нанотермоэлектричество – в последние 2-3 года наноразмерные системы показали выдающееся поведение в повышении коэффициента эффективности термоэлектрической генерации и охлаждения;
- Нанотермофотоника – новое направление энергетики на наномасштабах – методы прямого преобразования тепловой энергии в электрическую с использованием функциональных наноматериалов;
- Метаматериалы с тепловыми свойствами и эффектами необычного электромагнитного поведения;
- Сложные нанокомпозиты на основе неорганических и органических материалов, в том числе биоактивных;
- фотовольтоника, оптоэлектроника и светодиоды с проблемами отвода тепла от точек генерации;
- Новые системы теплового управления водородными системами в топливных элементах;
- Тепловые насосы с использованием полых нанопроволок и нанотрубок;
- Нанoeлектромеханические системы с тепловым приводом для генерации электрической энергии и сенсорики;
-

Литература:

1. А.С. Дмитриев. Введение в нанотеплофизику. БИНОМ. Лаборатория знаний. Москва. 2015.
2. А.С. Дмитриев. Тепловые процессы в наноструктурах. М. Изд. МЭИ. 2012.
3. А.С. Дмитриев, И.А. Михайлова. Введение в наноэнергетику. М. Изд. МЭИ. 2011.
4. А.С. Дмитриев, И.А. Михайлова. Физико-химия наноструктур. М. Изд. МЭИ. 2012.
5. А.С. Дмитриев. Теплофизические проблемы наноэнергетики. Часть 1. Теплоэнергетика. № 12. 2010.
6. А.С. Дмитриев. Теплофизические проблемы наноэнергетики. Часть 2. Теплоэнергетика. № 4. 2011.

**«НАШ МИР – НЕ ЗАВЕРШЕНЬЕ,
ТАМ ДАЛЬШЕ НОВЫЙ КРУГ...»**

**СПАСИБО БОЛЬШОЕ
ЗА ВНИМАНИЕ !!!**



eNANO