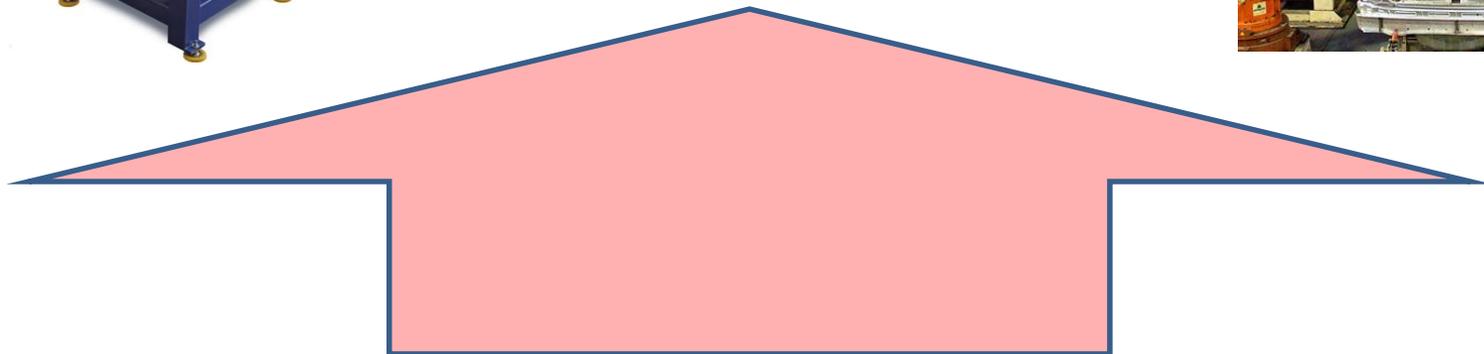
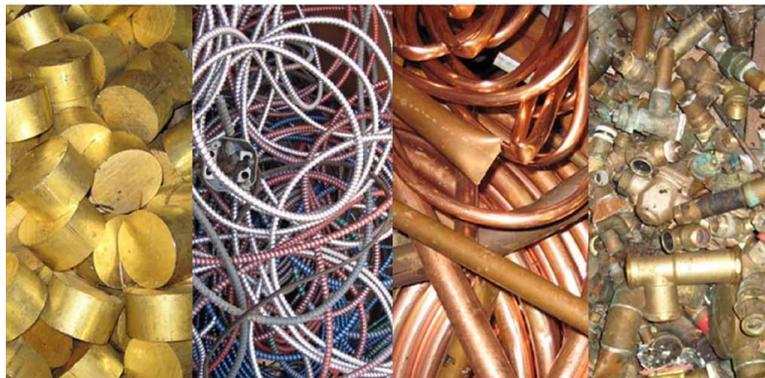




# ЭНЕРГИЯ

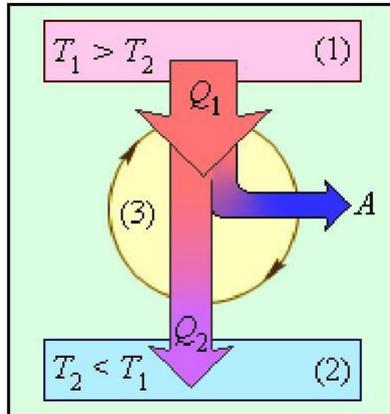




Э н е р г и я

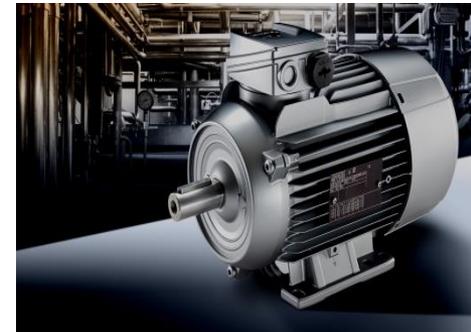
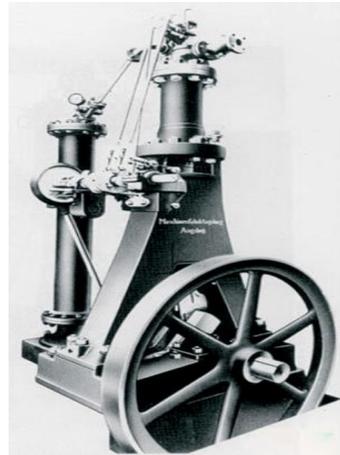


Энергетическая схема тепловой машины:



- 1 – нагреватель; 2 – холодильник; 3 – рабочее тело, совершающее круговой процесс.  $Q_1 > 0$ ,  $A > 0$ ,  $Q_2 < 0$ ;  $T_1 > T_2$

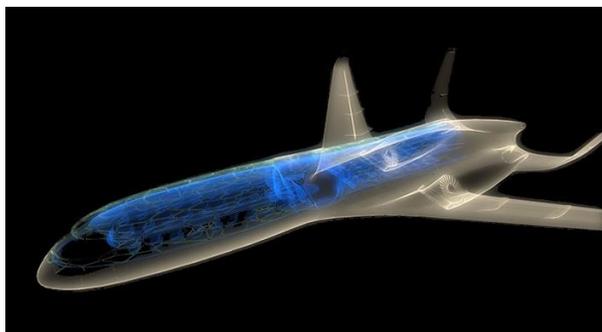
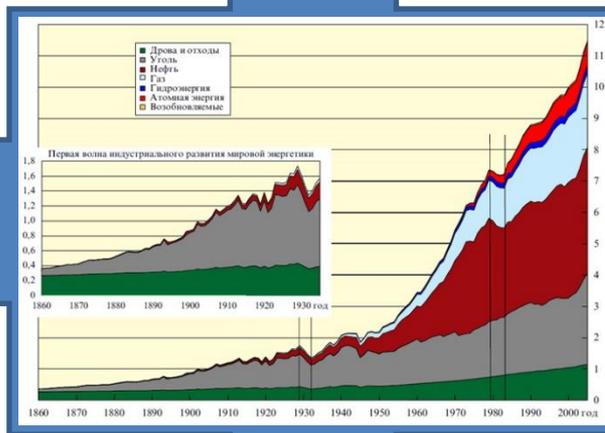
Необратимость процессов в природе



КПД

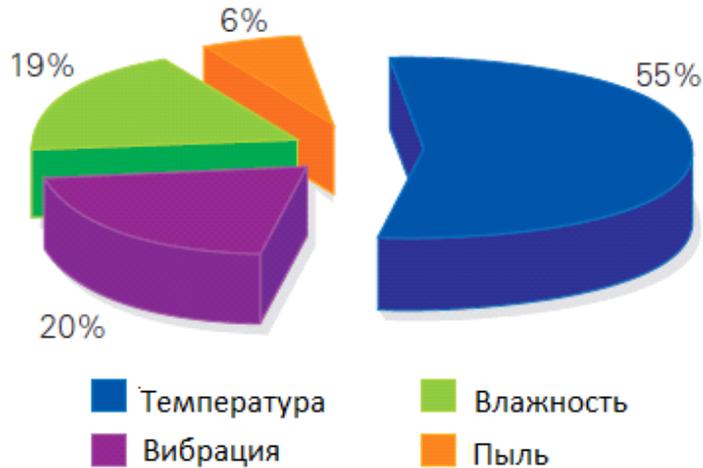
ЭФФЕКТИВНОСТЬ → 90 - 95%





## Основные факторы отказов электронной аппаратуры

(по данным ВВС США).



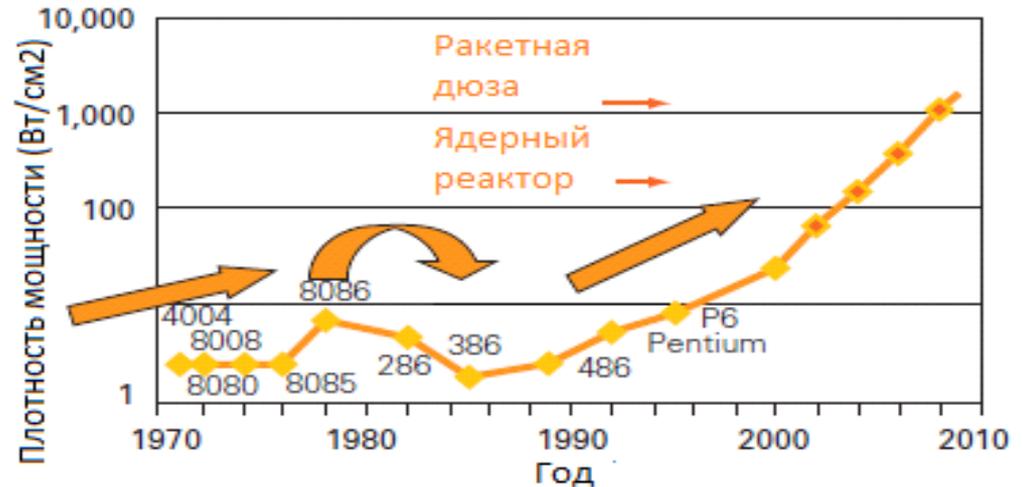
- NASA: 90% отказов оборудования и провала миссий происходит по причине разрыва контактов из-за термически вызванных механических стрессов,

- Японское космическое агентство (NASDA): 50% неудач при выполнении миссий происходит по причине перенапряженных паянных соединений на приборах,

- ВВС США: 55% отказов военной электроники возникает из-за термических эффектов.

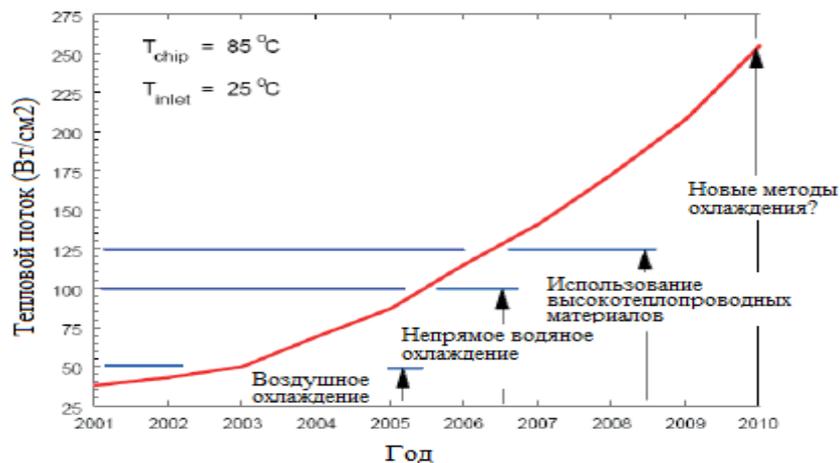
**«По прогнозам глобальный рынок устройств и материалов обеспечивающих теплоотвод достигнет объема в 11,2 млрд. \$ в 2016 году. Рост рынка в промежутке между 2016 и 2021 гг ожидается на уровне в 5,6% в год».**

Ввиду чрезвычайной важности указанных проблем, их определяющего влияния на состояние и развитие множества оборонных и высокотехнологичных проектов, в США принята стратегия, призванная обеспечить лидерство в области материалов для теплоотвода. В ряде развитых западных стран также принимаются программы нацеленные на поддержку ускоренного развития областей материаловедения решающих проблемы корпусирования электронных приборов и теплоотвода.

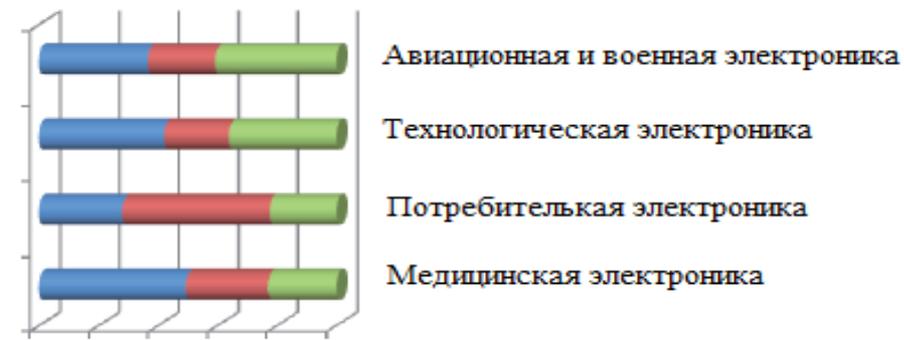
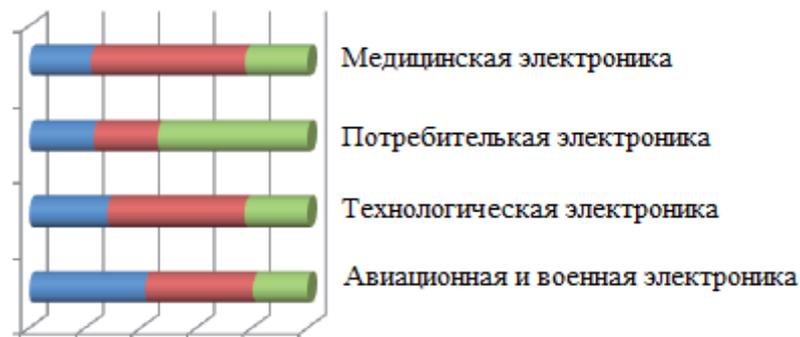


(<http://www.aavid.com>, <http://www.thermacore.com>,  
<http://www.timtronics.com>, <http://www.europanthermodynamics.com>,  
<http://www.lairdtech.com/product-categories/thermal-management>,  
<http://www.1-act.com> – компании призванные обеспечивать комплексные решения в области термоменеджмента....



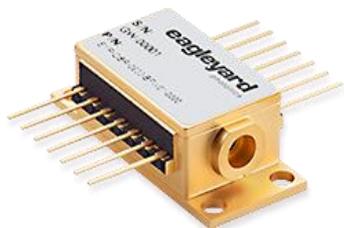


\* Источник IBM США

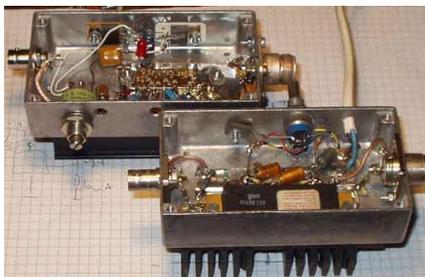


\* Источник HCL Technologies Ltd.

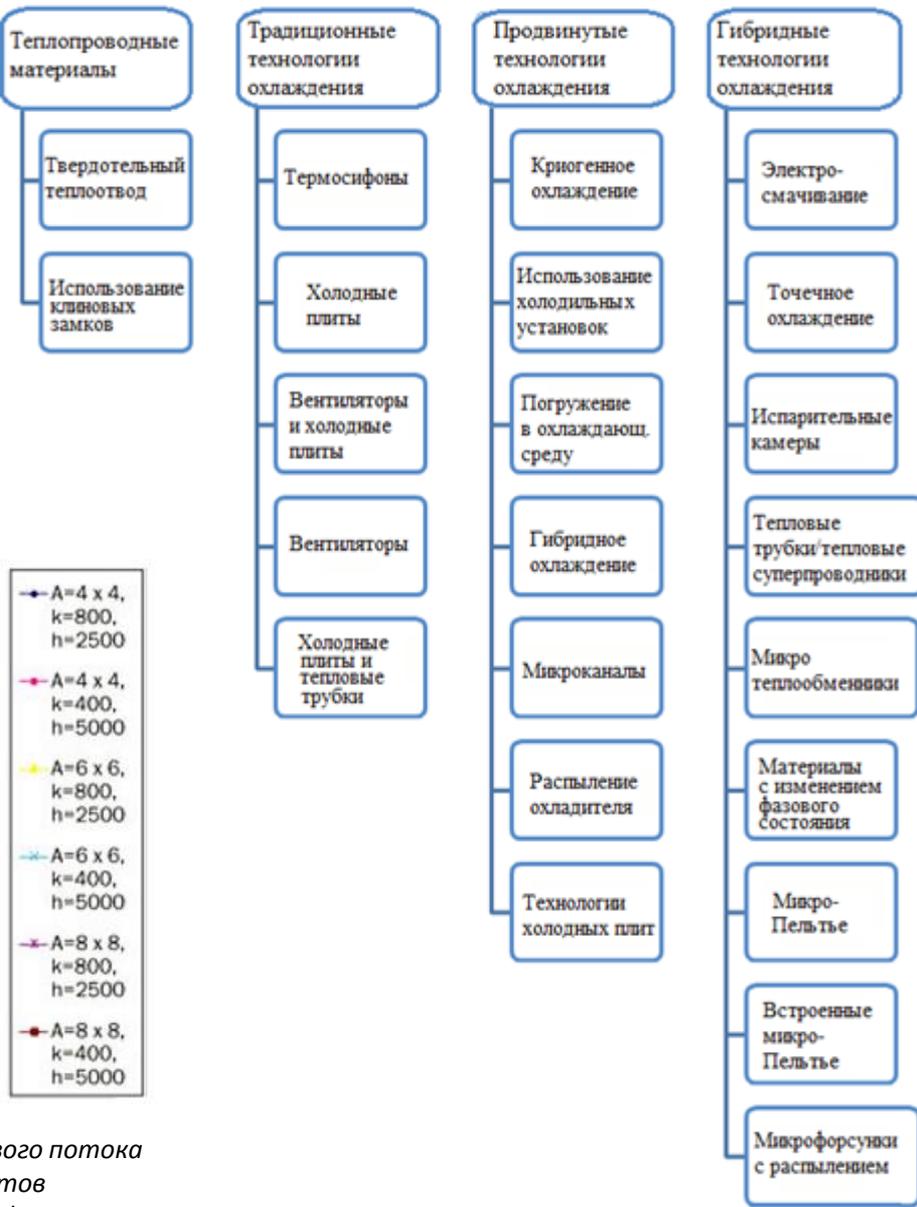




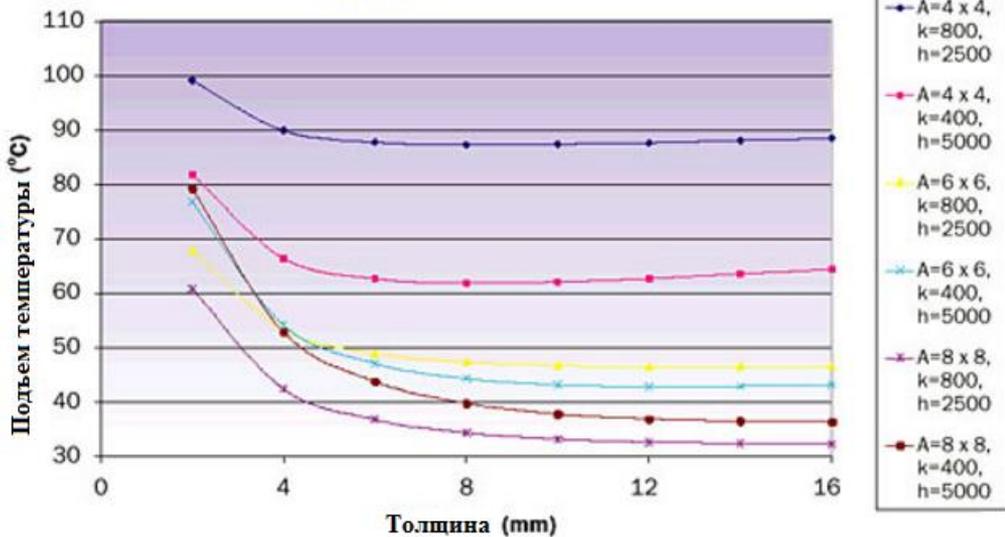
Мощность выделяемая в п/п лазере: более 2000 Вт/см<sup>2</sup>.



Мощности порядка нескольких кВт/см<sup>2</sup> могут выделяться в активных СВЧ устройствах.

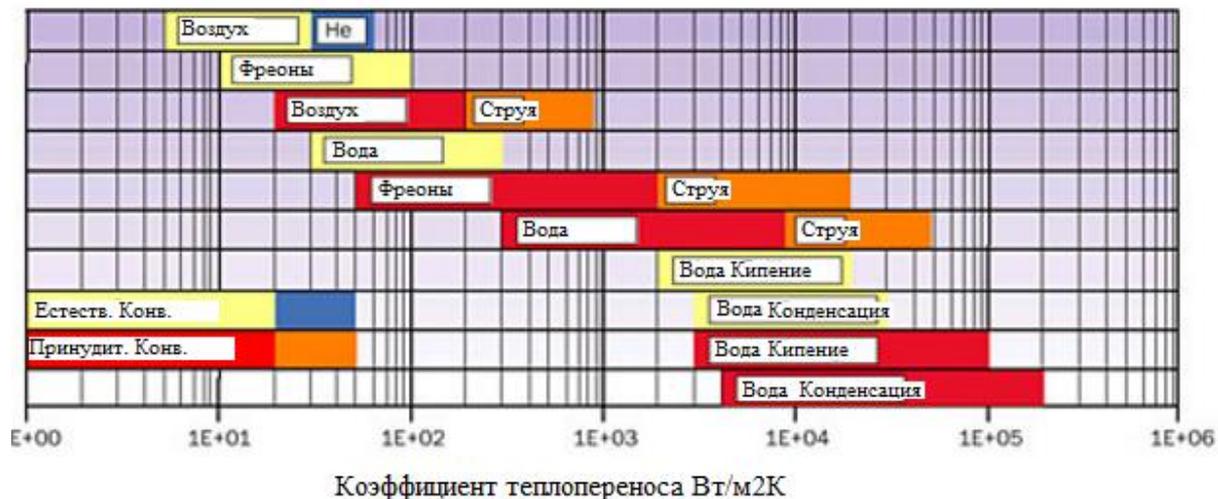


Источник 300W, 1 x 2 см

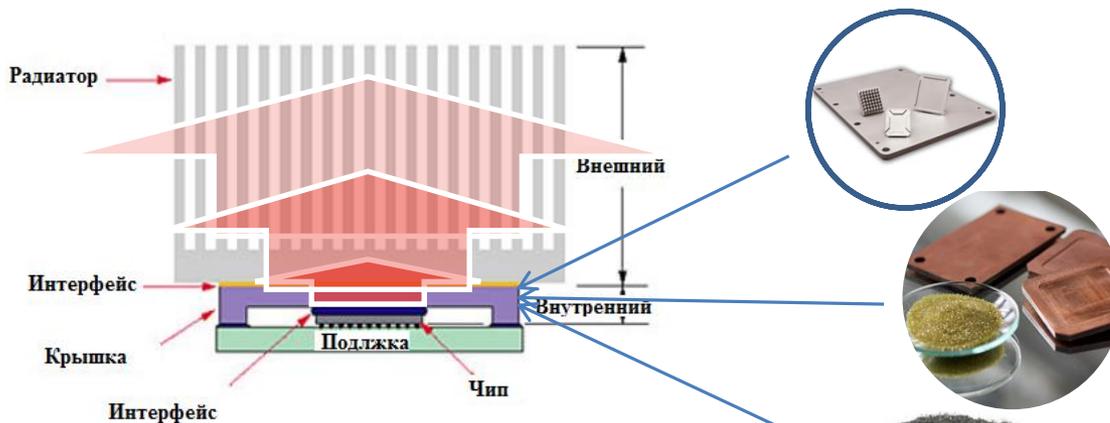


Пример влияния толщины и площади подложки для отвода теплового потока для материалов с различными теплопроводностями и двух вариантов коэффициента передачи тепла с поверхности (A в см<sup>2</sup>, K в Вт/м<sup>2</sup>\*K, h в Вт/м<sup>2</sup>\*K).





Обеспечение отвода теплового потока  $100 \text{ Вт/с м}^2$  при разнице температур  $50 \text{ К}$  требует использовать системы с  $K$  теплопереноса порядка  $20000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ .



Минимизация теплового сопротивления требует применения интерфейсных материалов с высокой теплопроводностью. Например Rogers Inc. заявляет достижение  $k$ -та теплопроводн. для паст наполненных нано алмазами порядка нескольких деся  $\text{Вт/м}^2\text{К}$ .

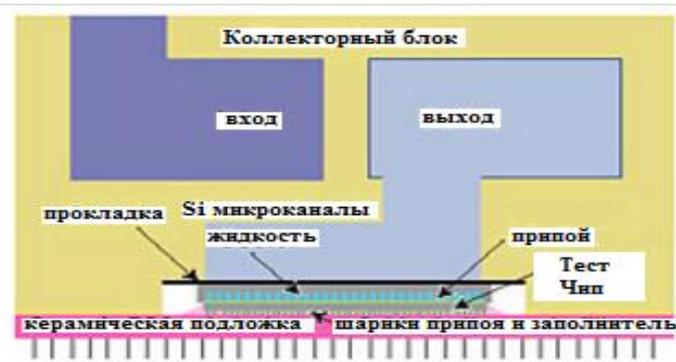
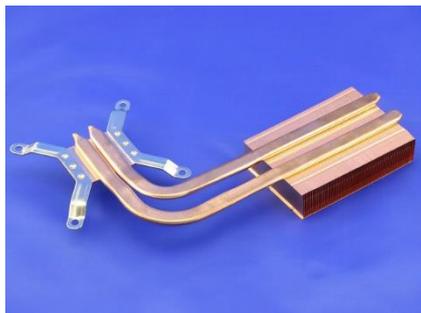
Для воздушного теплоотвода:

- стандартные вентиляторы:  $\sim 150 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  (примерно  $1 \text{ Вт/см}^2$  для  $\Delta T=60 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- с «синтетическими» струями  $\sim 900 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  (высокий шум!);
- Специальные системы с высокоскоростными вентиляторами – до  $50 \text{ Вт/см}^2$ ;

Увеличение теплопередачи при использовании «синтетических» струй связано с высокой турбулентностью и перемешиванием пограничных слоев!

NanoFoil® Ignition

## Не прямое жидкостное охлаждение



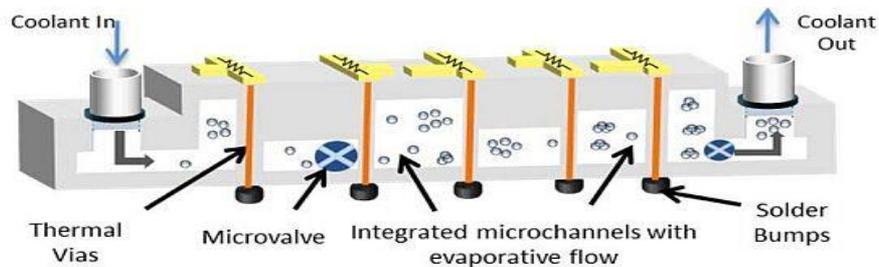
Эффективная теплопроводность тепловых трубок находится в диапазоне: 50 – 200 кВт/мК, на практике значительно меньше из-за интерфейсных тепловых сопротивлений. Могут снимать тепловые потоки в 10 – 300 Вт/см<sup>2</sup>. Типичная медная с водой ТТ – 100 Вт/см<sup>2</sup>. Пульсирующие тепловые трубы - до 1300 Вт/см<sup>2</sup>.

2D тепловые трубы – «паровые камеры», очень эффективны для устранения локальных «горячих точек». Эффективная теплопроводность может достигать теплопроводности алмаза.

В микроканальных охладителях коэффициент передачи тепла обратно пропорционален гидравлическому диаметру канала при сохранении ламинарного режима течения. Теоретически достижимыми с помощью таких систем теплоотводы в диапазоне 1000 – 100000 Вт/см<sup>2</sup>. На практике применяются для охлаждения устройств с площадью меньше чем 7 x 7 см. Бывают одно и двух фазные микроканальные холодные плиты. Для работы двух фазных требуется существенно меньший расход жидкости и рабочие давления. Типичные параметры однофазных систем: 300 Вт/см<sup>2</sup>, 24 кПа, 1,5 л/мин. В IBM и других компаниях реализуются концепции использования микроканальных холодных плит в силиконовой подложке совмещенной с СБИС или припаяваемой отдельной. Для двухфазных систем реалистично достижение теплоотвода в 1000 Вт/см<sup>2</sup>.



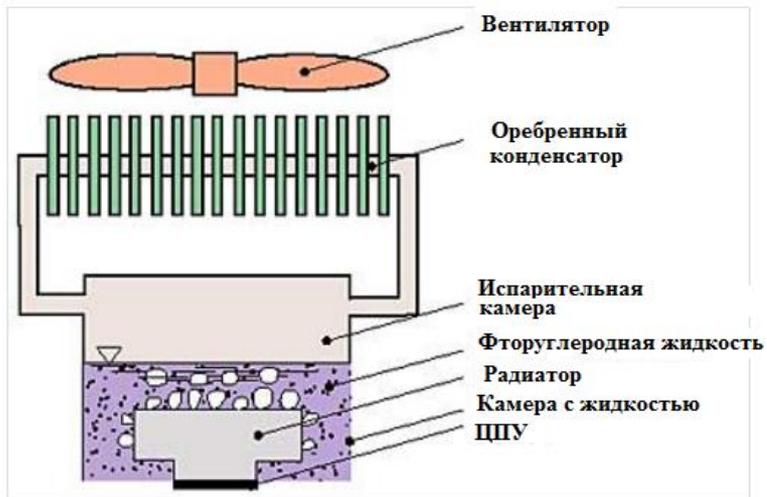
Холодные плиты активные устройства с прокачкой жидкого охладителя. Типично достижимые параметры: теплоотвод 790 Вт/см<sup>2</sup>, при увеличении температуры на 71 °С при прокачке воды со скоростью 600 мл/мин в плите с микроканалами с перепадом давления 207кПа.



В исследовательском центре “Watson” компании IBM в лаборатории военной авионики разрабатывают чипы с микрофлюидным жидкостным охлаждением. Выделяемая чипом мощность превышает 1 кВт/см<sup>2</sup>. Локальные выделения мощности на чипе превышают 5 кВт/см<sup>2</sup>.

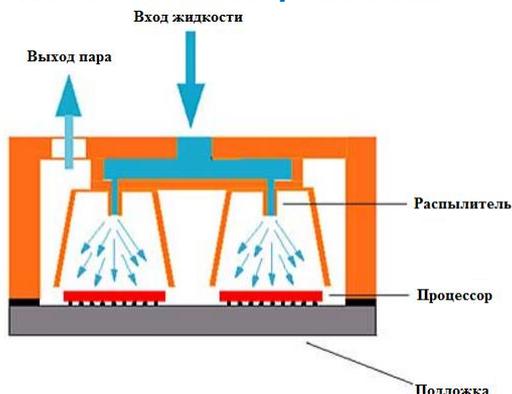


## Прямое жидкостное охлаждение



Прямое охлаждение жидкостью – широко распространенный метод. С использованием естественной конвекции и двухфазного потока с теплоносителем FC-72 удастся добиться эффективности охлаждения в диапазоне 5 – 20 Вт/см<sup>2</sup>. Если применять специальную обработку поверхности источника тепла удастся добиться эффективности 100 Вт/см<sup>2</sup>.

## Охлаждение микрокаплями

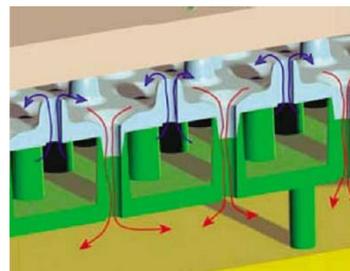
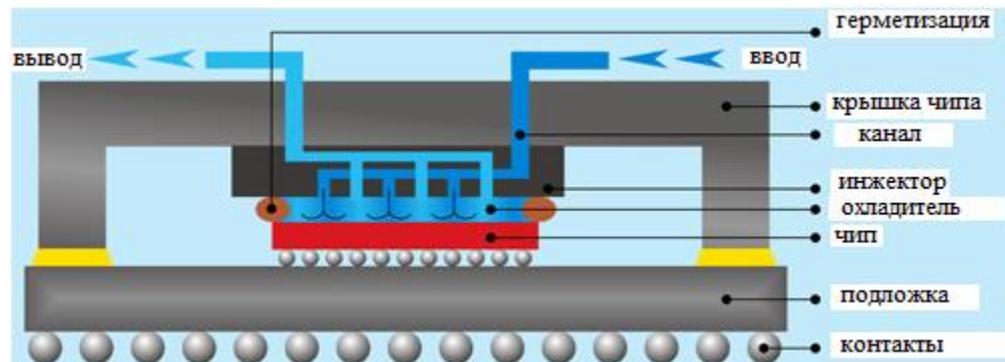


### Тепловое сопротивление для систем:

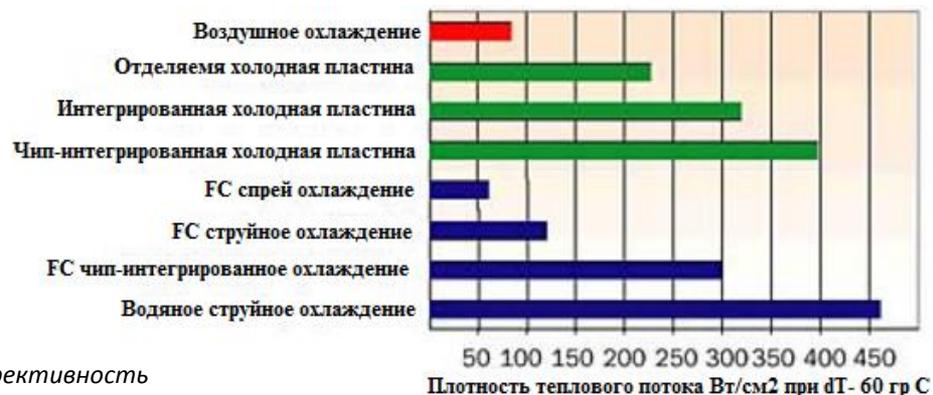
- с воздушным охлаждением – 0,1 С/Вт,
- с водяным охлаждением – 0,01 С/Вт.

Максимально достижимая эффективность охлаждения – 270 Вт/см<sup>2</sup>.

## Охлаждение микроструями

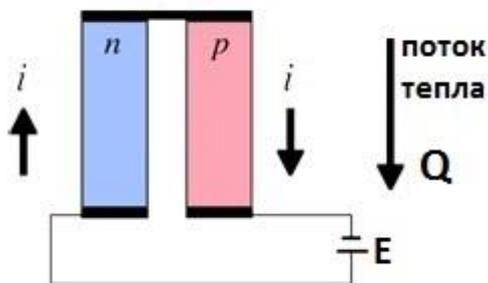


Сообщается о достижении эффективности охлаждения в 90 Вт/см<sup>2</sup> при подъеме температуры до 100 °С с максимальным потоком 8 мл/мин. В технологическом университете Джорджии добились эффективности 180 Вт/см<sup>2</sup> используя воду с расходом 300 мл/мин при давлении 300 кПа (использовался микронасос 7 Вт). В сравнении с устройствами использующими микроканалы микроструйный подход обеспечивает лучшую равномерность и контролируемость охлаждения, но более сложен технологически.



## Твердотельное охлаждение

### Эффект Пельтье

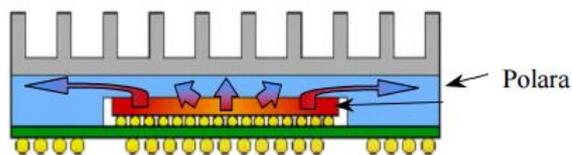
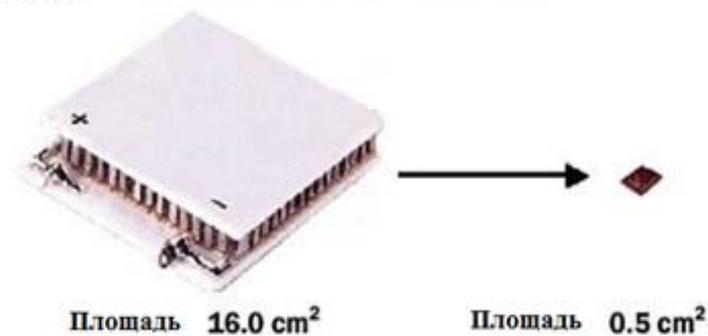


$Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$ ;  $Bi_2Te_3$  и  $Bi_2Se_3$ ;  
Эффективность охлаждения  
обратно пропорциональна  
толщине.

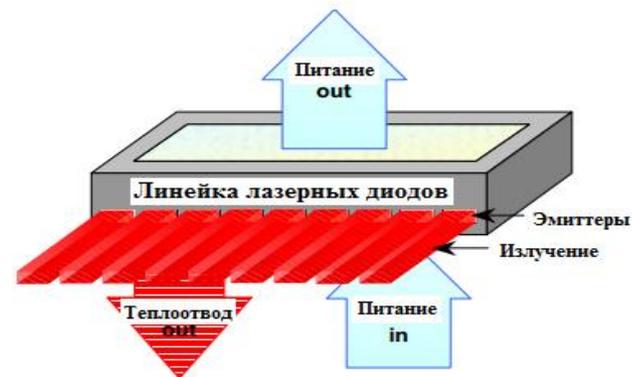
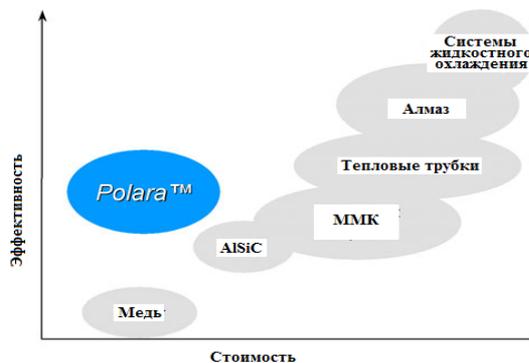
$$ZT = \frac{\sigma S^2 T}{\lambda}$$

Эффективность традиционных  
элементов Пельтье порядка 5 – 10  
Вт/см<sup>2</sup>. Эффективность  
тонкопленочных Пельтье может  
достигать 10 – 1000 Вт/см<sup>2</sup> ( $\Delta T \sim 50 - 70$  K на один переход).

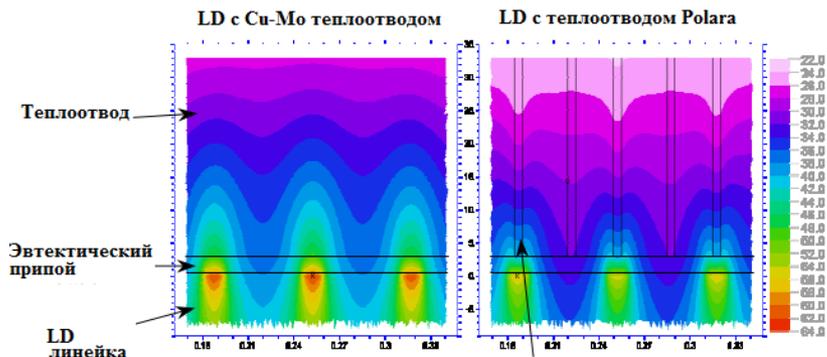
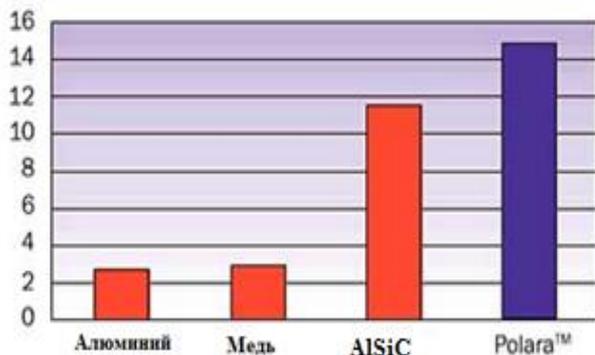
Оба элемента способны переносить 70 Вт тепловой мощности, но площадь тонкопленочного ТЕС в 30 раз меньше!



Если охлаждаемая поверхность всегда имеет более высокую температуру – в структуре ТЕС могут использоваться высокотеплопроводные п/п материалы.



### Эффективная теплопроводность Вт/К

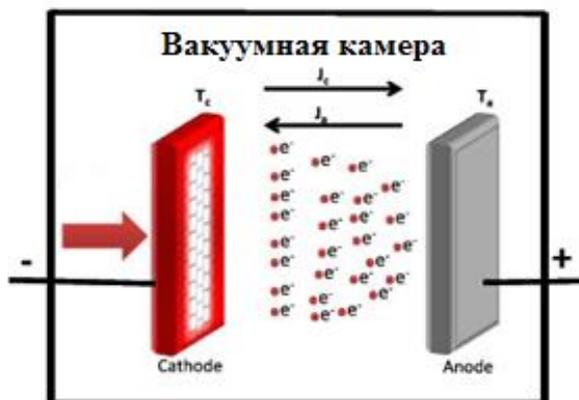


Теплоотвод Polara с тепловыми мостиками над эмиттерами

- Обеспечивает теплоотвод более 1 кВт/см<sup>2</sup>,
- ТКЛР совпадает с GaAs,
- 20% стоимости алмазного теплоотвода.



## Термоионное охлаждение

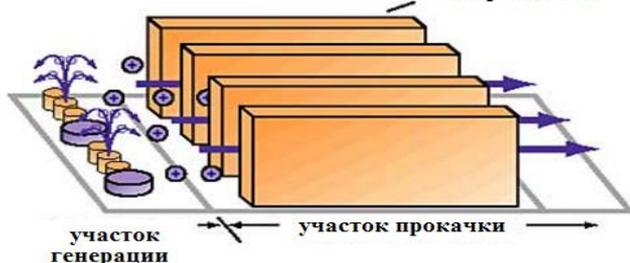


Модель для термоэлектронной эмиссии

Ионный ветер в микромасштабе

Ионизация

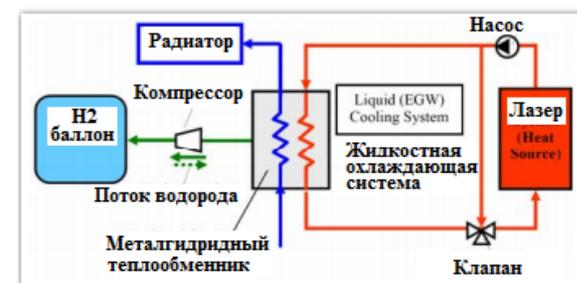
Микроканалы



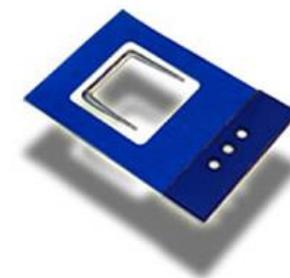
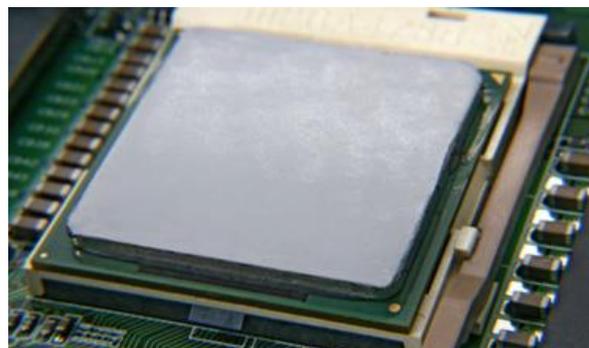
Эффективность теплосъема: до 40 Вт/см<sup>2</sup>!

Доступны материалы с работой выхода порядка 0,7 эВ. Вакуумные термоионные охладители работают при  $T$  катода больше 500 К. Обеспечивают эффективность удаления тепла на уровне кВт/см<sup>2</sup>. Высокие рабочие токи – порядка  $10^5$  А/см<sup>2</sup>.

## Материалы с изменением фазового состояния и термоаккумуляторы



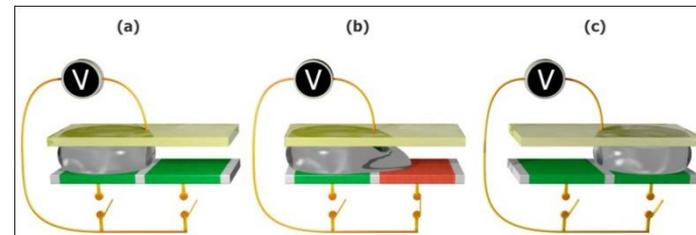
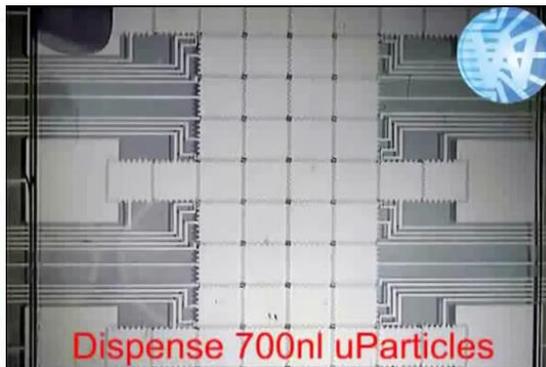
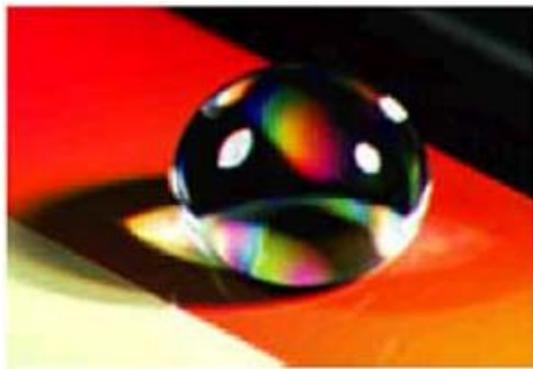
Поглощение энергии: медь, нагрев до 100 С – 40 кДж/кг; испарение воды – 2260 кДж/кг; эндотермические реакции (метал гидрид) – до 7000 кДж/кг.



Indigo™ интерфейсный материал с изменением фазового состояния на основе легкоплавких металлов.

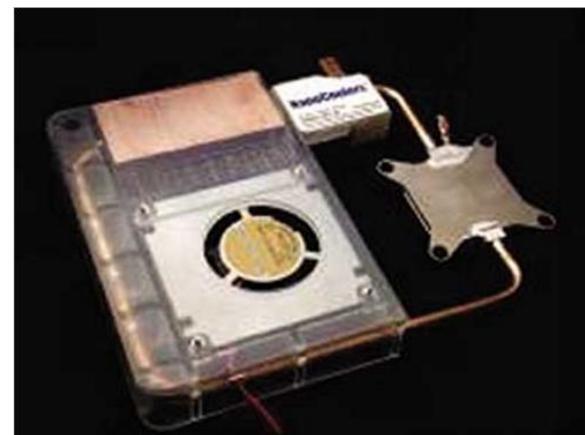
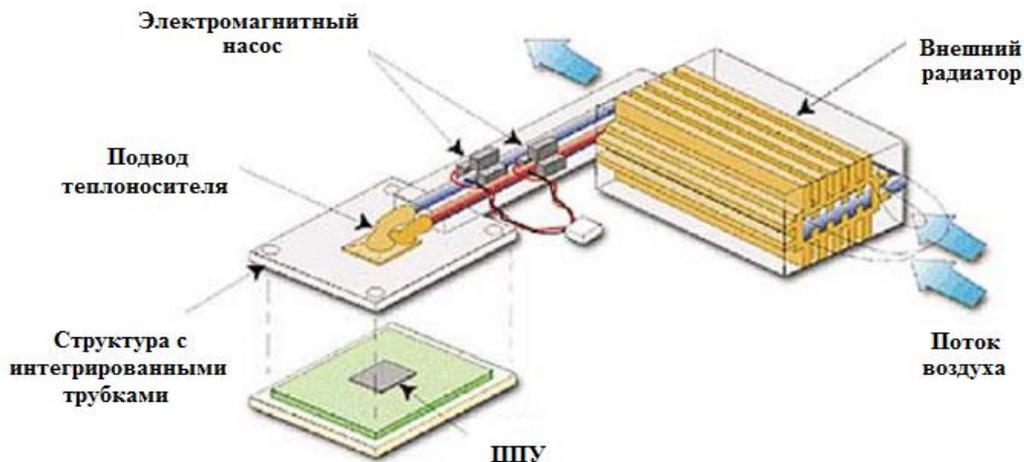
- теплопроводность > 20 Вт/мК,
- тепловое сопротивление < 0,04 °С-см<sup>2</sup>/Вт.





Возможность получения микроструктур использующих эффект электросмачивания для управления движением капель жидкости открыло перспективы их применения для охлаждения чипов. Расчеты показывают, что с помощью таких структур можно снимать до  $90 \text{ Вт/см}^2$  тепловой мощности при расходе жидкости  $0,4 \text{ мл/мин}$ .

### Охлаждение жидким металлом



Большое количество исследований проводится по использованию эвтектик  $\text{Ga-Sn-In}$ , не замерзающих до  $-19 \text{ }^\circ\text{C}$ . С использованием магнитодинамических микронасосов обеспечивающих расход  $0,3 \text{ л/мин}$  и давление  $15 \text{ кПа}$ , удается добиться снятия тепловой мощности порядка  $200 \text{ Вт/см}^2$ . Ведутся работы по получению составов остающихся жидкими до  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Замерзание таких систем не выводит их из строя благодаря значительно более низкому по сравнению с водой ТКР.



### Heat Sinks by Product Line



#### HIGH DENSITY DIE CASTING

Well suited to making high performance heat sinks and liquid cold plates using aluminum alloys...



#### HYDROSINK

An intelligent, innovative, high performance Liquid Cooling System which aims to replace...



#### EXTRUSION HEAT SINKS

North American Extrusions follow Aluminum Association Standards. Find the right extrusion from...



#### MAX CLIP SYSTEM

Clip and rail thermal solutions for power transistors. A high performance, low cost solution to...



#### BONDED FIN

Bonded Fin technologies cool high power applications with high fin densities unavailable in...



#### LIQUID COLD PLATES

For high heat concentrations, HiContact™ assemblies offer a cost effective method of cooling....



#### PRECISION TEMPERATURE CONTROL LIQUID COOLING SYSTEM

a total solution for applications in solar power, wind power, traction, electricity transmission...



#### INTEGRATED HEAT PIPE ASSEMBLIES

Solutions for heat transport, spreading, or weight savings.



#### FOLDED FIN ASSEMBLIES

Folded Fin technology adds surface area to cool high power applications in a lightweight package...



#### FORCED CONVECTION COOLERS

Custom designed thermal solutions using quadrant extrusions to cool high power applications.

и другие продукты .....

### Interface Materials

#### PHASE CHANGE MATERIALS

Unique materials that change from solid to film-like grease for increased stability and easy...



#### INSULATING HARDWARE

Available in a range of base materials to provide a variety of dielectric and thermally...



#### THERMAL GREASES

Thermally conductive compounds that provide a mechanical strength to the bond between heat sink...



#### NON-INSULATING PADS & FILMS

Developed for unique design challenges that require enhanced heat conduction.



#### ATTACHMENT TAPES

Thermal tapes adhere to heat sink and device and can be electrically conductive or isolating...



#### INSULATING PADS & FILMS

Low cost thermal insulators designed for easy application.

#### THERMAL ADHESIVES & EPOXIES

Epoxies and glues that provide both thermal conductivity and strong adhesion and can be used...



#### GAP FILLERS

Thermally conductive materials uniquely designed to allow for variations in surfaces.



## Задел: разработка и производство композитов для термоменеджмента

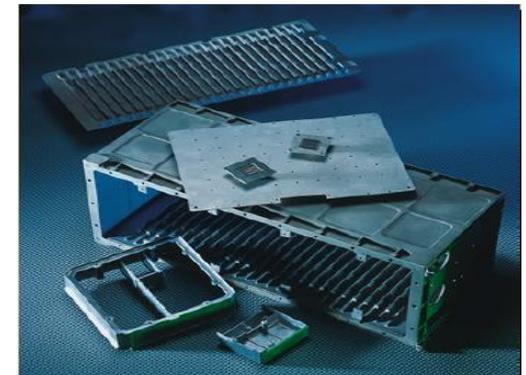


***AlSiC*** — *высоко теплопроводный композит*

*Уникальное сочетание свойств матричного сплава и наполнителя позволяет путем изменения соотношения компонентов регулировать физические свойства получаемого МММ AlSiC.*

**Физико-механические свойства материала**

Наименование параметра	Значение параметра		Единица измерения
	min.	max.	
ТКЛР	6,5	8,5	$\cdot 10^{-6}$ 1/К
Плотность	2,9	3,5	г/см <sup>3</sup>
Удельная теплоемкость	не менее 0,45		кДж/кг*К
Теплопроводность	160	180	Вт/м*К
Прочность на изгиб	300		Мпа
Модуль упругости	210		ГПа
Уд. электрическое сопротивление	20		мкОм/см



*Такой материал при низкой стоимости исходных материалов обладает невысокой плотностью, регулируемым ТКЛР, высокой теплопроводностью, прочностью и твердостью.*

**Al-Gr (алюминий графит) – супер высокотеплопроводный композит:**

	<b>ТКЛР, ppm</b>	<b>Теплопроводность, Вт/м*К</b>	<b>Прочность на изгиб, МПа</b>	<b>Плотность, г/см<sup>3</sup></b>
<b>Al— Gr</b>	От 5 — до 7	200 — 600	55 - 30	2,5 — 2,3

**Технология получения композитов Al-Gr:**

- пропитка под давлением расплавами алюминиевых сплавов пористых графитовых преформ;
- электроплазменное спекание в вакууме, горячее спекание в вакууме;

**Технология получения пористых графитовых преформ:**

- прессование со связующим;

**Используемые типы графитового наполнителя:**

- молотый природный малозольный графит;
- киш графит;
- высокомодульное высокотеплопроводное молотое углеродное волокно;

**Механообработка:**

- серийное металлообрабатывающее оборудование, HSS инструмент;



**Al-ТПГ сверх теплопроводный композит на основе пластин и тонких пленок термического пирографита инкапсулированного в металлические оболочки в виде плат и оснований:**

	<b>ТКЛР, ppm</b>	<b>Теплопроводность, в плоскости высокой теплопроводности Вт/м*К</b>	<b>Прочность на изгиб, МПа</b>	<b>Плотность, г/см<sup>3</sup></b>
<b>Al - ТПГ</b>	7 — 21 (при использовании для оболочек композита и чистого Al сплава)	От 1000 — до 1200	100 - 250	2,4 — 2,6

**Технология получения теплопроводников:**

- диффузионная сварка;
- литье под давлением с закладками ТПГ;

**Используемые размеры ТПГ:**

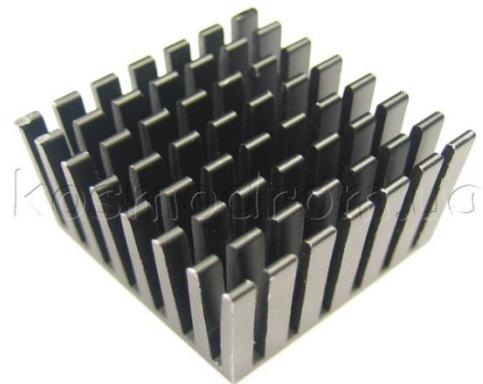
- Пленки ТПГ толщиной 20 — 200 мкм;
- пластины ТПГ толщиной 0,5 — 5 мм;

**Механообработка:**

- серийное металлообрабатывающее оборудование, HSS инструмент;



Основное технологическое звено- литейная машина «Buhler Carat 105 compact». Комплекс позволяет получать высококачественные тонкостенные отливки сложной конфигурации с высокой точностью размеров.



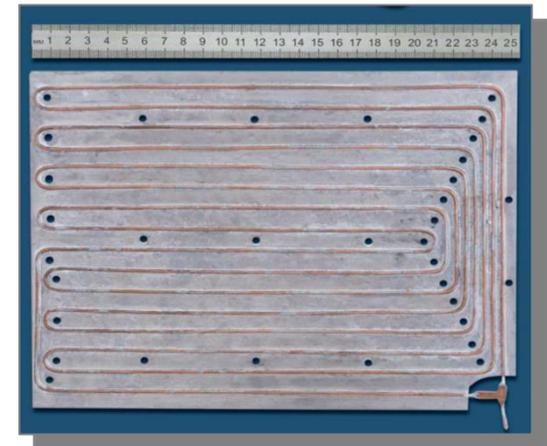
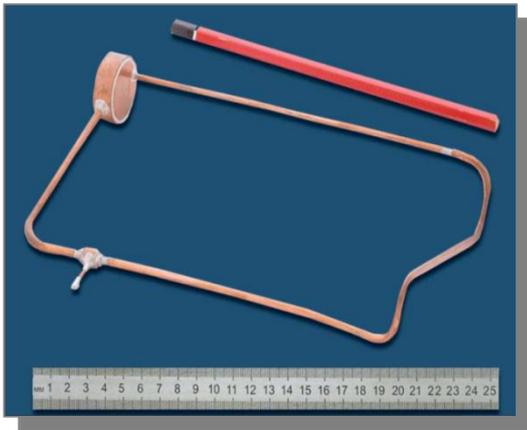
МЕТАЛЛ  КОМПОЗИТ



Что нужно добавить в первую очередь: партнерские компании



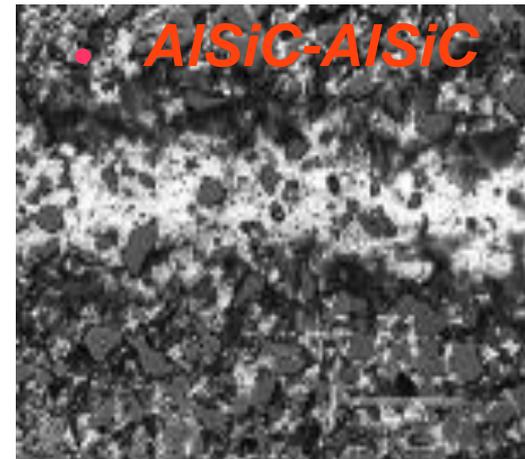
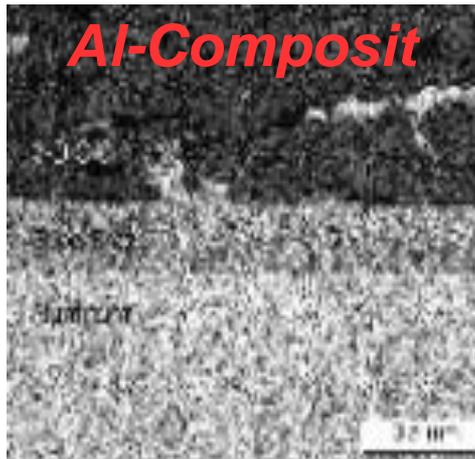
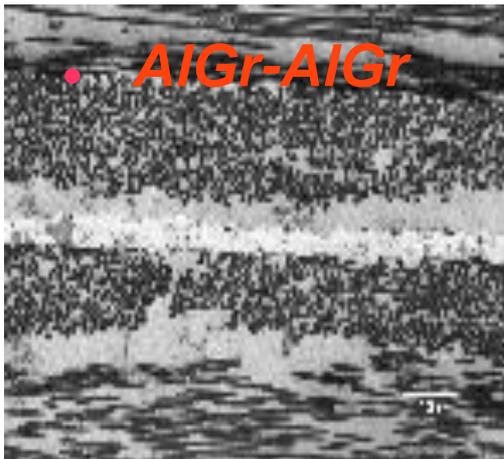
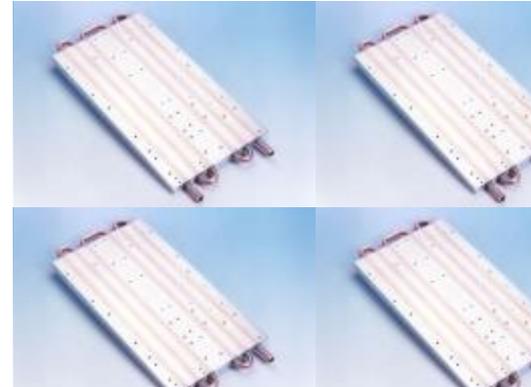
**«Теркон-КТТ» осуществляет серийный выпуск широкой номенклатуры контурных тепловых труб, пульсирующих тепловых труб, контурных термосифонов и комплексных систем теплоотвода на их основе для радио- и оптоэлектронных устройств и вычислительной техники.**





Уникальная технология пайки позволяющая соединять широкий спектр различных материалов без использования дорогостоящего оборудования.

**S-Bond Technologies**



Радиолокаторы



Авионика



Космическая техника



Продукты для термоменеджмента:

HeatLab  
THERMAL MANAGEMENT

теркон-ктт  
Революционное  
ослаждение электроники

**S-Bond Technologies**

НОМАКОН  
Nomacon

МЕТАЛЛ КОМПОЗИТ

росоFOAM™  
THERMAL MANAGEMENT MATERIALS

Каменск-Уральский  
металлургический завод

Суперкомпьютеры



Автотранспорт



Использование  
низкопотенциального  
тепла



Персональные  
компьютеры



Электроника



Лазерная  
техника



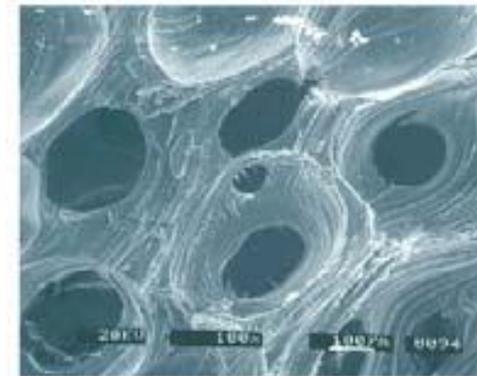


Пено-графит РосоFoам представляет собой очень легкий, пористый материал с исключительно высокой теплопроводностью для пеноматериалов.

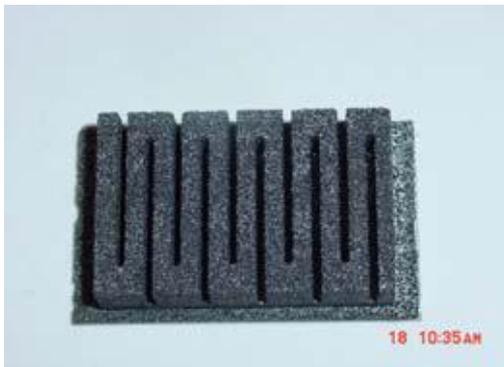
**Теплопроводность:** 100 - 150+ Вт/м\*К

**ТКЛР:** 2- 3  $10^{-6}$  К<sup>-1</sup>

**Плотность:** 0.2-0.6 г /см<sup>2</sup>



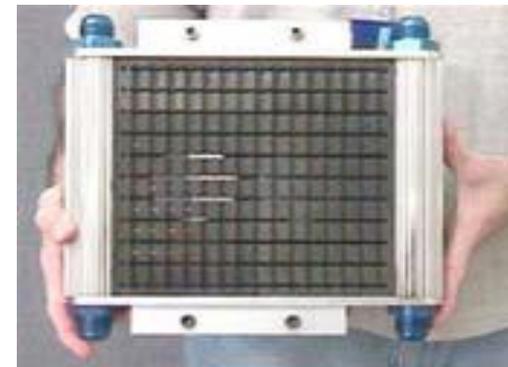
*Объединение технологии S-bond и пено-графитного материала позволит коренным образом изменить в будущем формы, размеры и расположение элементов термоменеджмента.*



**Пено-графит/подложка из Al2O3**



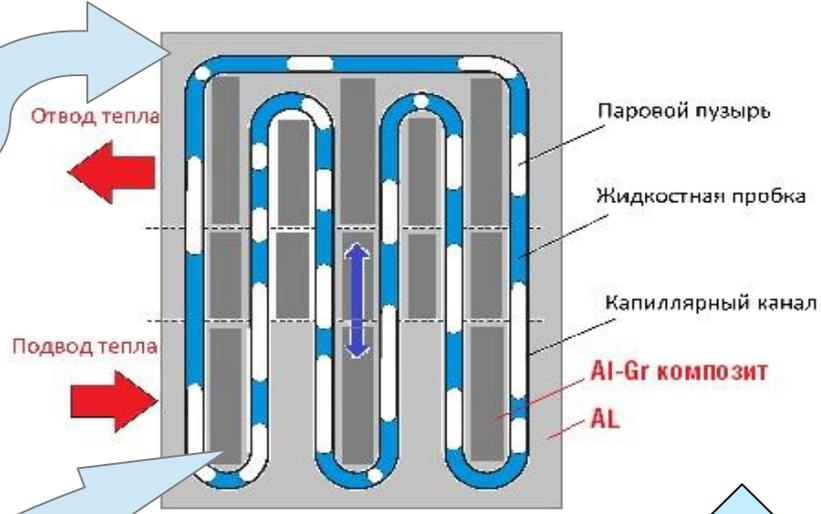
**Холодная пластина Al/пено-графит**



**Теплообменник Al-трубки / пено-графит**



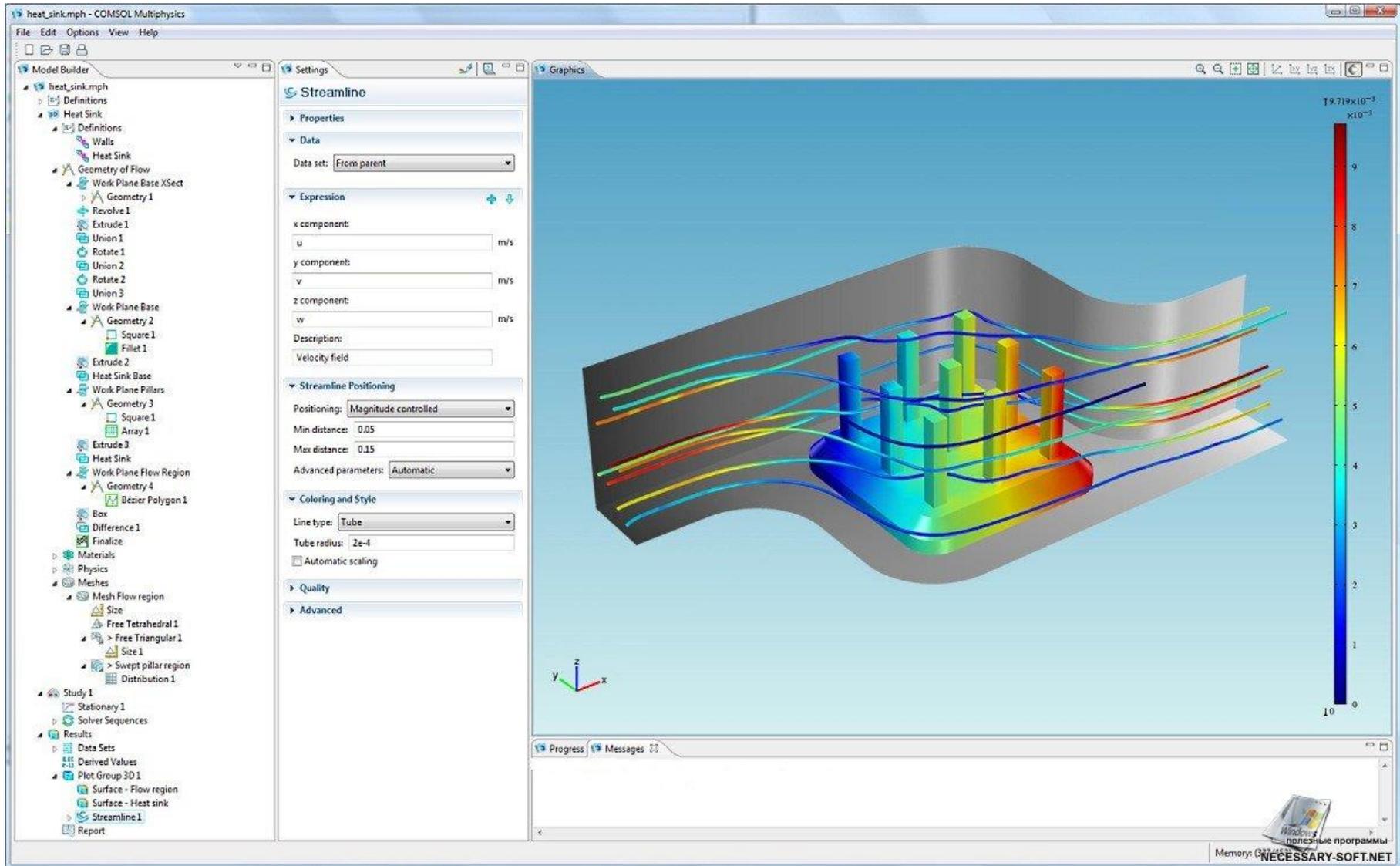
Пример перспективного продукта: холодная плита большой площади с сверхвысокой теплопроводностью.

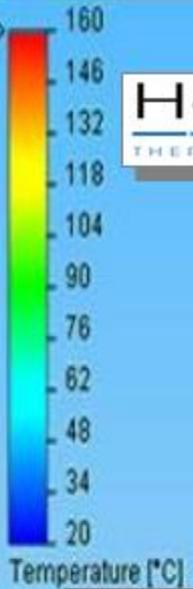


**S-Bond Technologies**

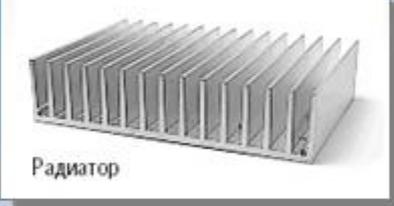
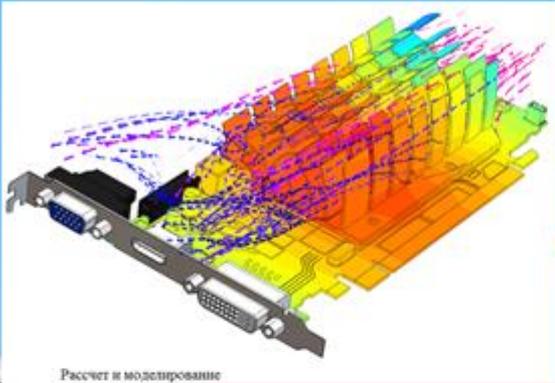
Технология пайки позволяющая соединять широкий спектр различных материалов







**HeatLab**  
THERMAL MANAGEMENT



# Спасибо за внимание!

*Потапов Сергей Николаевич  
рук. направления  
ООО «ХитЛаб», г. Ульяновск*

*Е.м. [s.potapov@darscompany.ru](mailto:s.potapov@darscompany.ru)  
Тел.: +7 (8422) 586309  
Моб. +7 927-821-0784*