

# *HEAT TRANSFER IN SILICON MICROHOTPLATE STRUCTURES*

## Численный Анализ Теплопередачи в Кремниевых Микро-нагревательных Структурах

**S. B. Beale R. Djebbar M. Post S.V. Zhubrin B. Delesalle**

**Heat/mass transfer MIF-2000 Тепломассообмен - ММФ-2000**

**NRC · CNRC**

**\*Institute for Chemical Process and Environmental Technology  
Институт Химического Процесса и Технологии Окружающей среды**

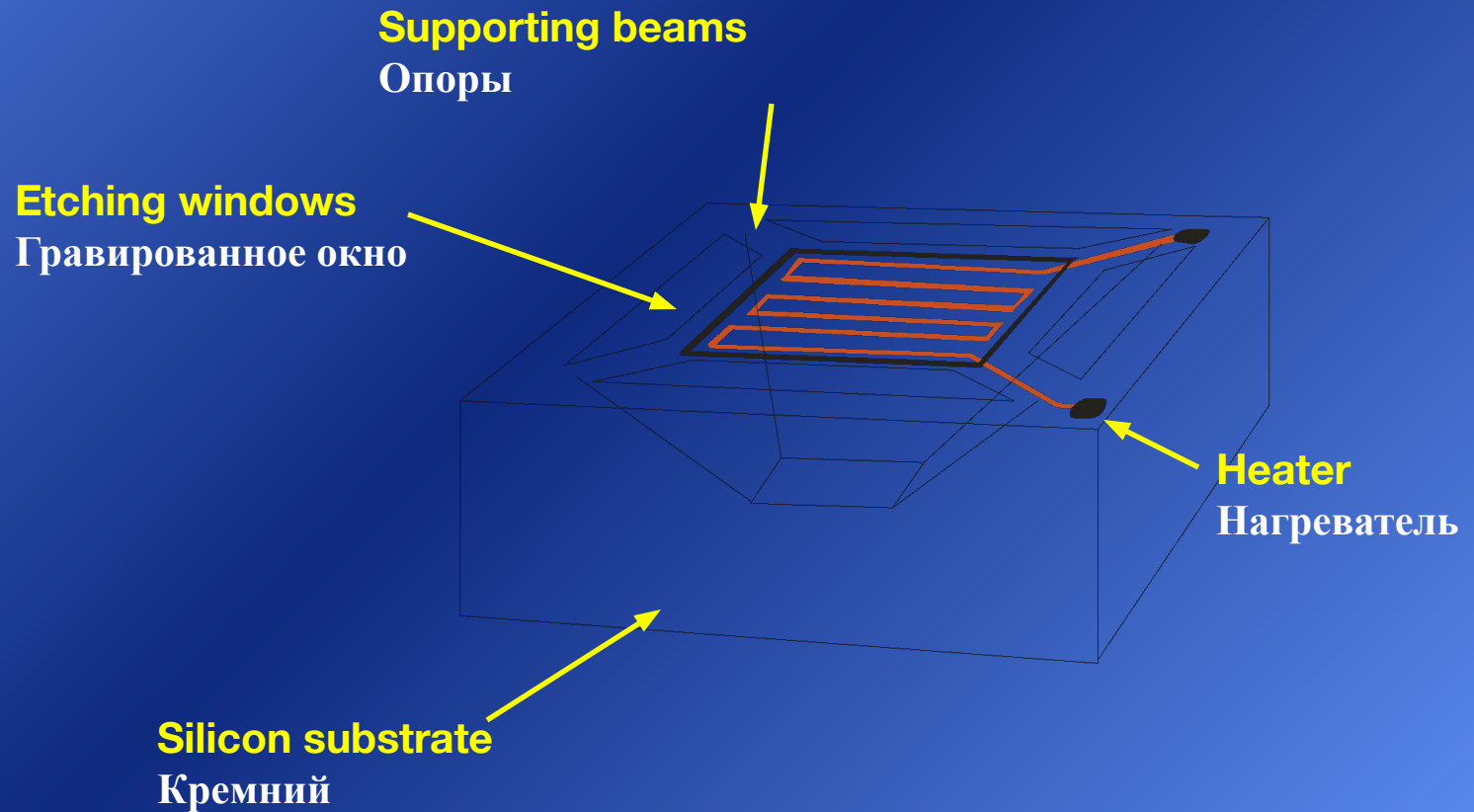
# *Introduction*

## Введение

- **Microhotplate (MHP) structures are subject of a four year NRC/industry/university collaborative research project**  
МНС = Микро-Нагревательные Структуры являются объектом четырехлетней, NRC/INDUSTRY/UNIVERSITY, совместной научно-исследовательской работы
- **Fabricated using a CMOS process**  
Изготавливаются с использованием процесса CMOS
- **Typical size: 200x200x5  $\mu\text{m}$**   
Типичный размер: 200x200x5 микрон
- **Operating temperature is around 500°C**  
Операционная температура - около 500° С

# *Schematic of MHP structure*

## Схемное решение структуры МНС



# *CMOS Process*

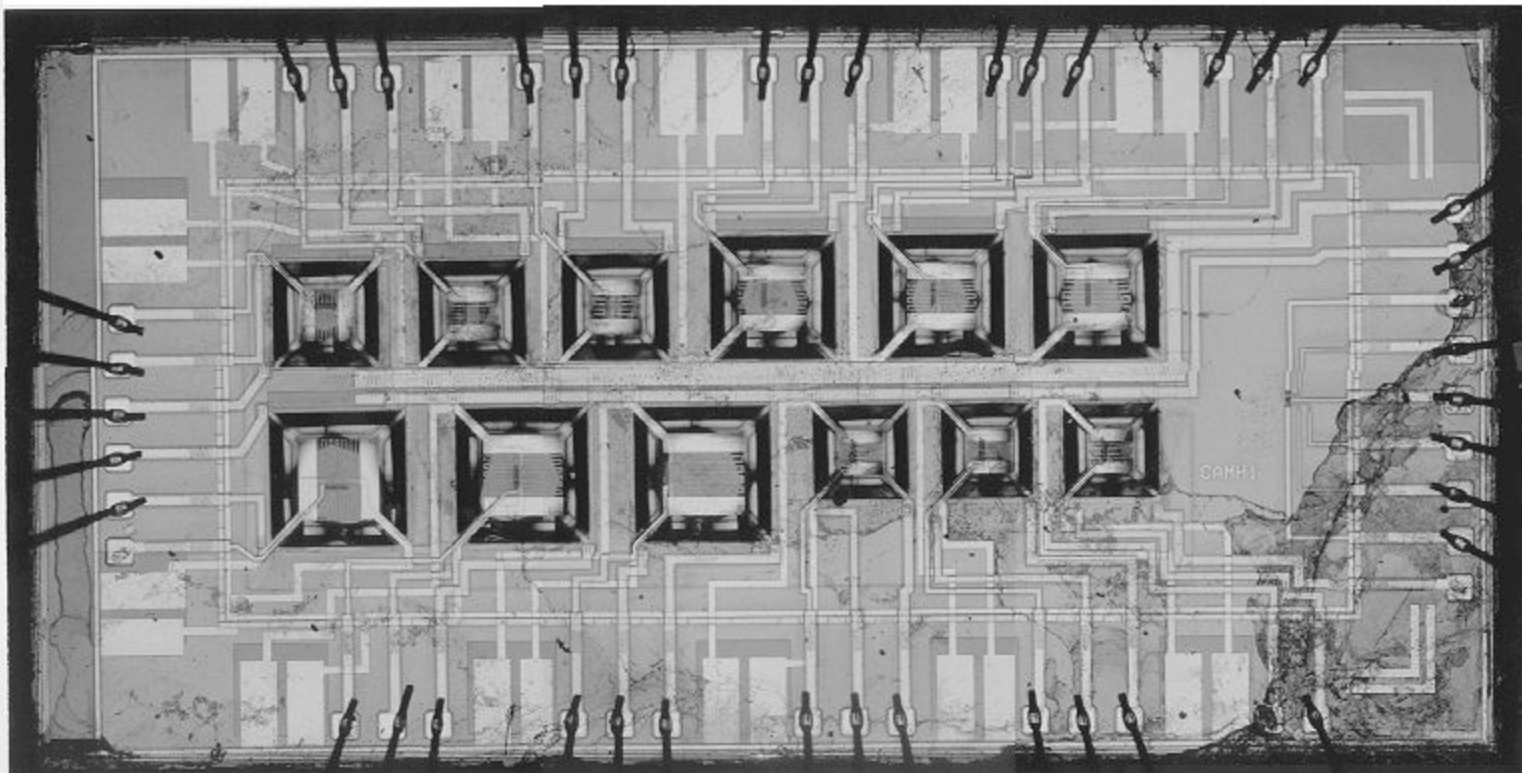
## CMOS Процесс



Elevation

# *Array of MHP structures*

## Множество МНС

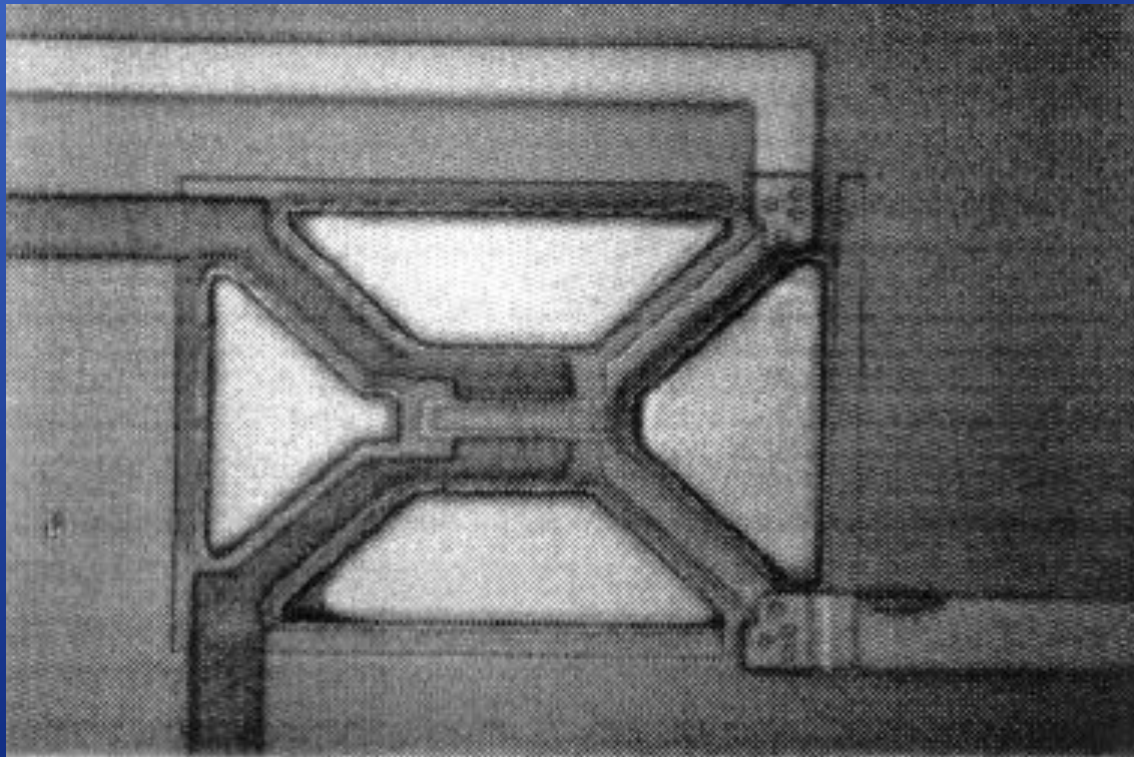


Plan



*Single MHP structure*

Отдельная МНС



Plan

# *Background*

## Постановка задачи

---

- **Two designs considered; Mark 1 and Mark 2**  
Рассмотрены две конструкции : МНС 1 и МНС 2
- **Temperature on target surface to be within 10 °C.**  
Температура целевой поверхности не выше 10 °C
- **Temperature in surrounding silicon should not be too hot as it will damage signal processing circuitry**  
Температура кремния не должна нарушать прохождение сигнала

# *Background*

## Постановка задачи

---

- Experimental work on local temperature distribution difficult, due to micro-geometry, variable optical properties  
Микро-размеры усложняют эксперименты
- Therefore embarked on a program of numerical heat transfer analysis  
Поэтому, рассмотрен численный анализ теплопередачи
- Software used: PHOENICS multi-block body fitted coordinates and Cartesian grids both considered  
Программа: PHOENICS, многоблоковые BFC и Декартовы сетки

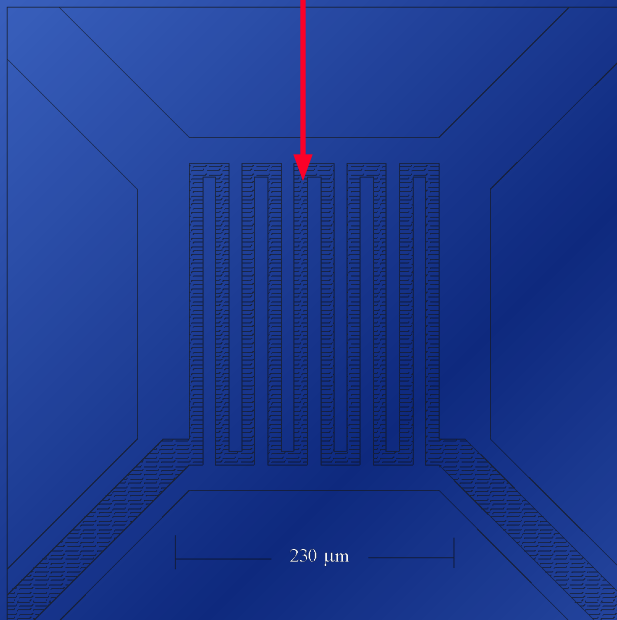


# *Two layers of mark 1 design*

## Два слоя МНС 1

**Polysilicon heater**

Поликремний Нагреватель



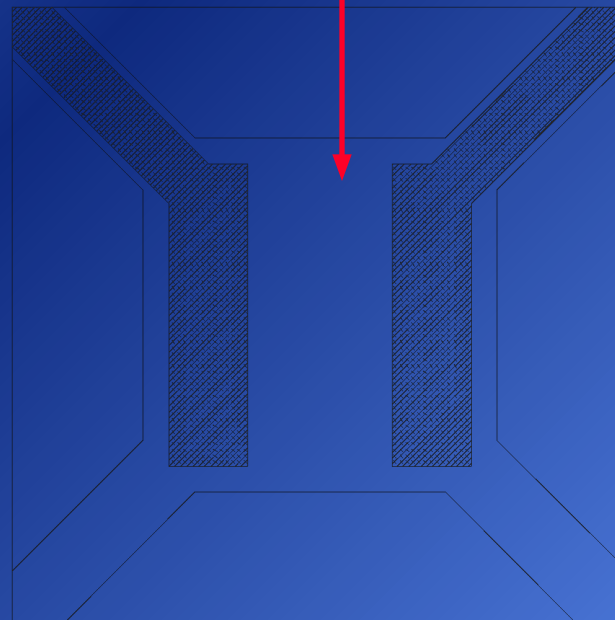
**Plan**

**Heater geometry**

Геометрия нагревателя

**Target area**

Целевая область



**Platinum contacts**

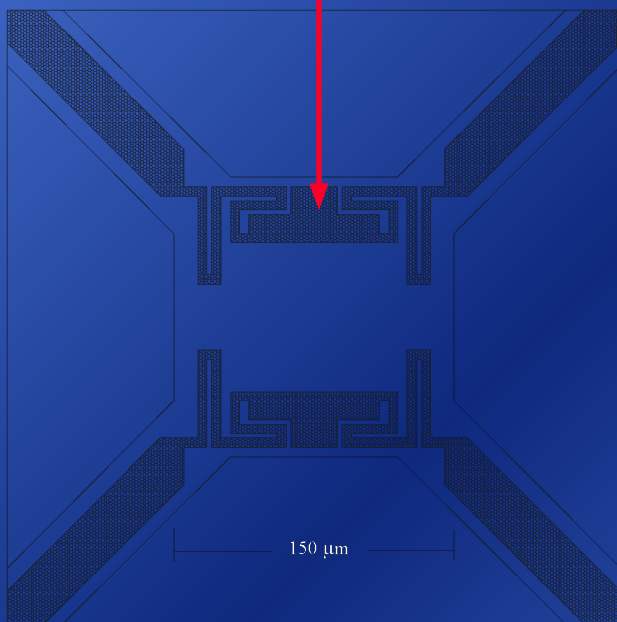
Платиновые контакты

# *Two layers of mark 2 design*

## Два слоя МНС 2

**Polysilicon heater**

Поликремний Нагреватель



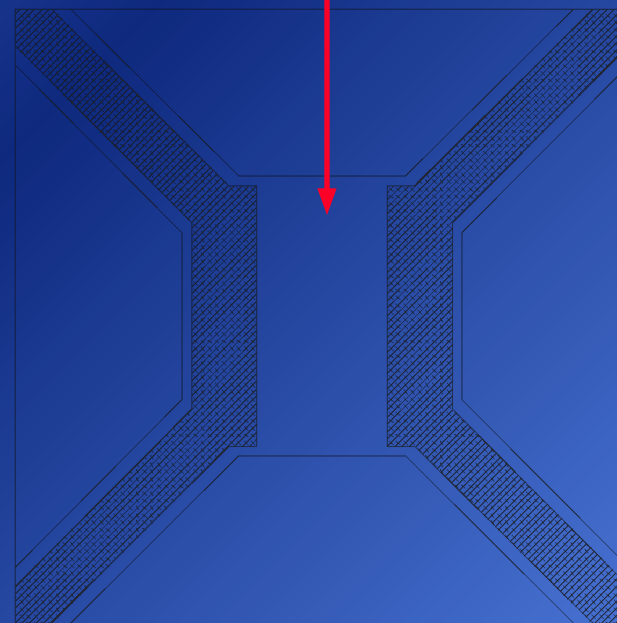
**Plan**

**Heater geometry**

Геометрия нагревателя

**Target area**

Целевая область



**Platinum contacts**

Платиновые контакты

# Heat conduction

## Теплопередача

- Convection and radiation are negligible. Problem is a conduction heat transfer problem with variable properties  
Конвекция и излучение малы. Задача теплопроводности с переменными свойствами.

$$\operatorname{div} \lambda \operatorname{grad} T = S$$

**NB:**  $\lambda = \lambda(x, y, z, T)$  The source term was assumed to be a constant volumetric term,

Источник предполагается постоянным в единице объема,

$$S = \frac{\dot{Q}}{V_{heater}} \left( W / m^3 \right)$$



# *Thermal conductivity*

## Теплопроводность

### **$\lambda$ variations from layer to layer:**

Изменения  $\lambda$  по слоям:

- **Harmonic averaging used.**  
Среднегармоническое осреднение

### **$\lambda$ variations within layer:**

Изменения  $\lambda$  в слое

- **Large scale structures handled as above with multiple values of  $\lambda$ .**  
Крупные структуры, как выше, с переменными  $\lambda$ .



# *Thermal conductivity*

## Теплопроводность

- Fine scale structures handled using an effective value  
Мелкие, через эффективные величины, как в

$$\lambda_{eff} = r_1\lambda_1 + r_2\lambda_2$$

- approach often used in heat transfer in porous media  
пористых средах

# Meshing and boundary conditions

## Сетка и Граничные условия

$T=20^{\circ}\text{C}$

Multi-block body-fitted grid  
многоблоковые ВФС

Air Воздух

$$\Phi = S \Delta V_{cell}$$

Etched cavity

Гравированная  
впадина

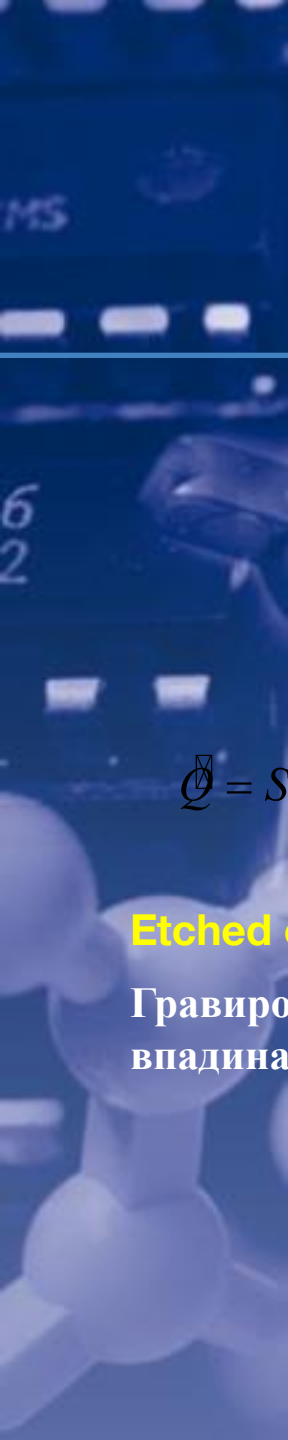
$T=20^{\circ}\text{C}$

Silicon substrate Кремний

$T=20^{\circ}\text{C}$

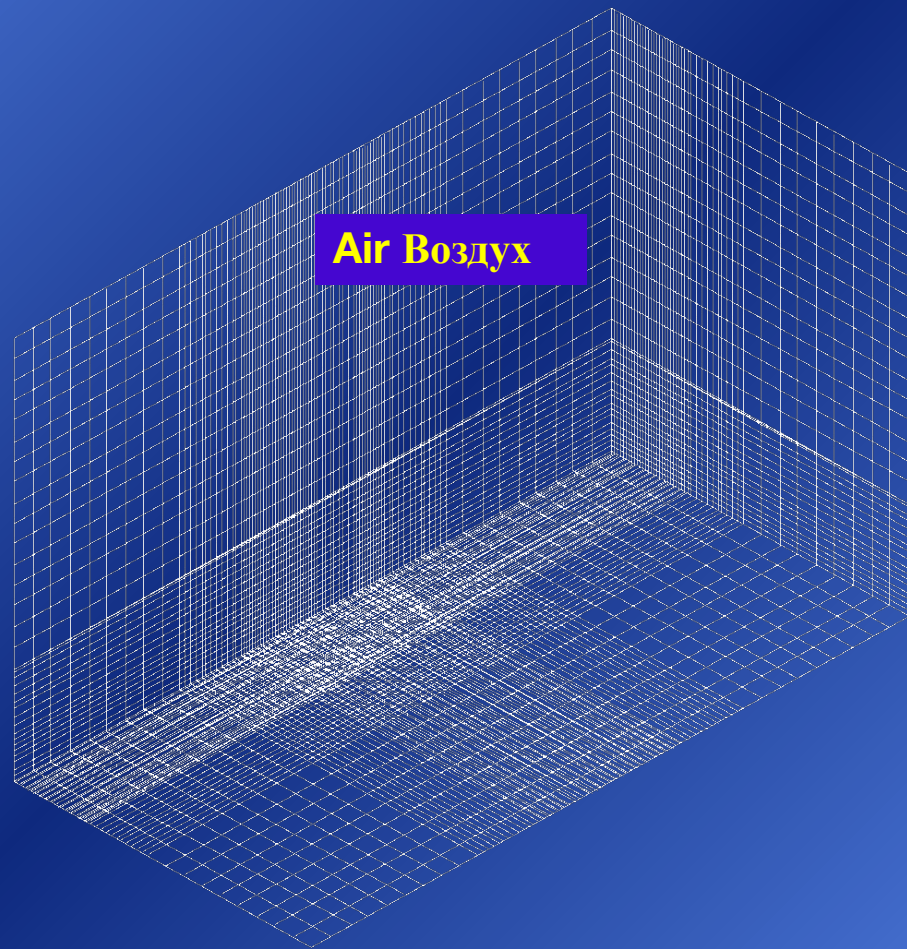
Cells concentrated  
within MHP

Ячейки,  
сконцентрированные  
в пределах МНР



# *Meshing: Cartesian grid*

## Сетка: многоблоковые Декартовы



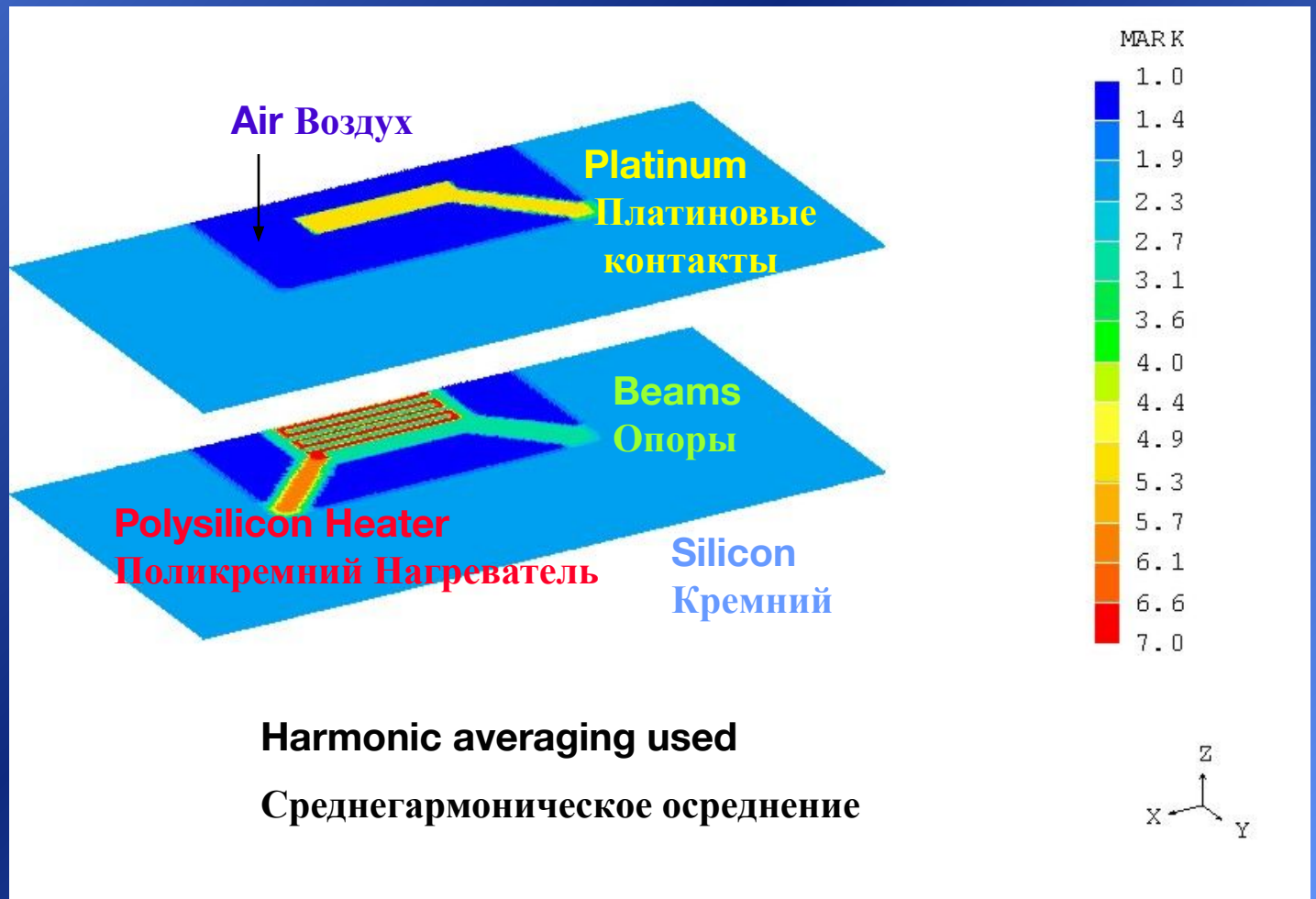
**Air Воздух**

**Cells concentrated  
within MHP**

Ячейки,  
сконцентрированные  
в пределах МНР

# Use of marker to identify different materials

## Использование маркера, чтобы идентифицировать различные материалы





# Experimental work

## Экспериментальная работа

**Power Supply**  
Источник  
питания

**MHP die**  
МНС форма

**Microscope objective**  
Объектив микроскопа

**Infra-red detector**  
Инфракрасный  
детектор



- Black body emission at  $\lambda=875$  nm of Mark 1 prototype measured. Calibration achieved with a larger constant- $\epsilon$  sample, probed with a thermocouple. Imaging resolution: 50  $\mu$ m

Измерено излучение абсолютно черного тела при  $\lambda=875$  nm для протипа МНС 1 Калибровка термопарами достигнута для образца с большим-  $\epsilon$   
Разрешение: 50  $\mu$ m

# Comparison with experimental data

## Сравнение с экспериментальными данными

$$U = \frac{Q}{A(\bar{T} - T_{\infty})}$$

**Numerical data:**

Численные расчеты:

$$U = 1.71 - 1.76 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{C}$$

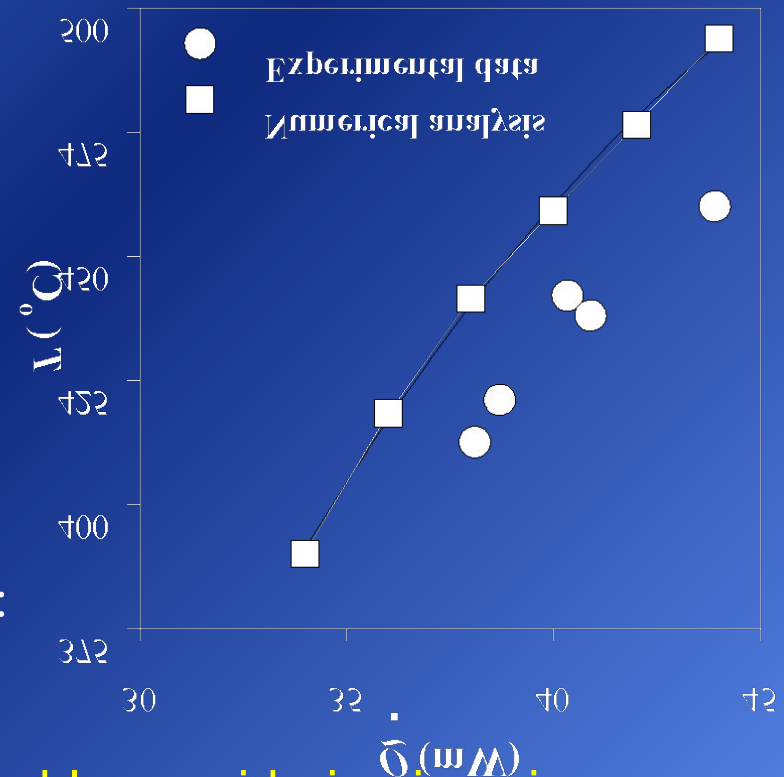
**Experimental data:**

Экспериментальные данные:

$$U = 1.81 - 1.89 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{C}$$

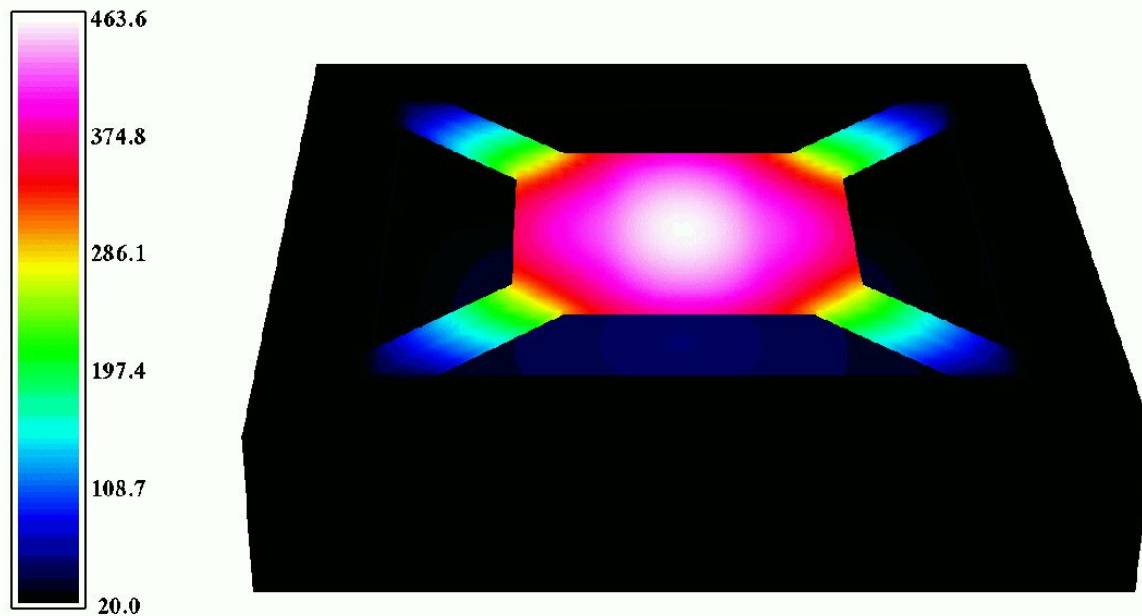
**6% difference: Quite reasonable considering imaging resolution only 50  $\mu\text{m}$  for a 250x250  $\mu\text{m}$  sample**

Различие 6 %: Весьма приемлимое, отображающее решение только 50  $\mu\text{m}$  для 250x250  $\mu\text{m}$  образца



# *Temperature distribution: Mark 1*

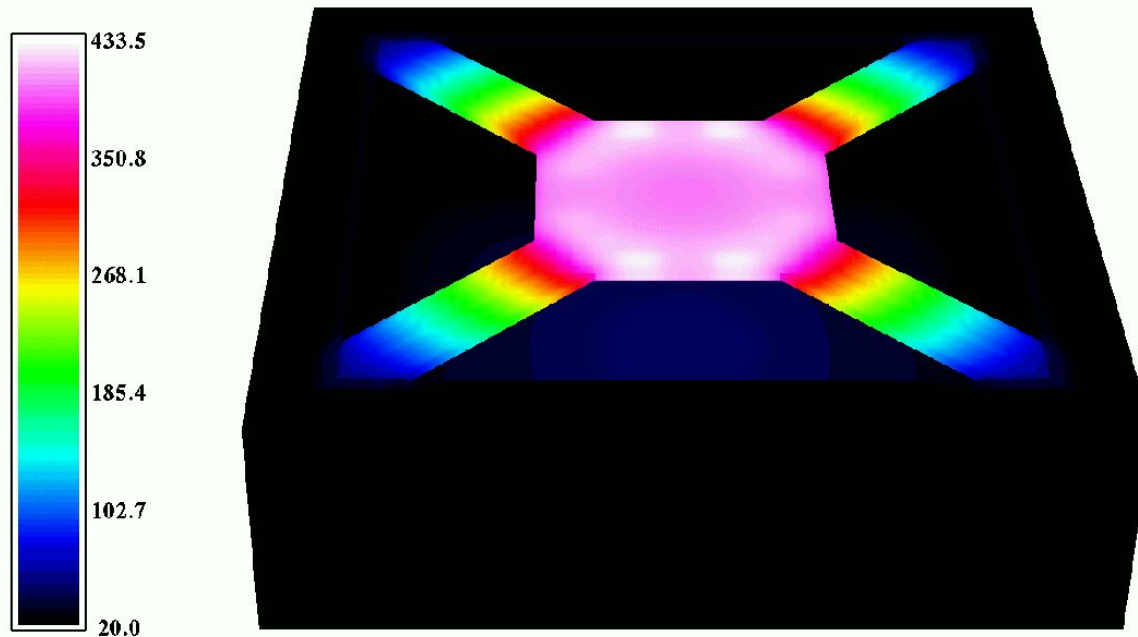
## Температура: МНС 1



Temperature field MHP mark 1 design

# *Temperature distribution: Mark 2*

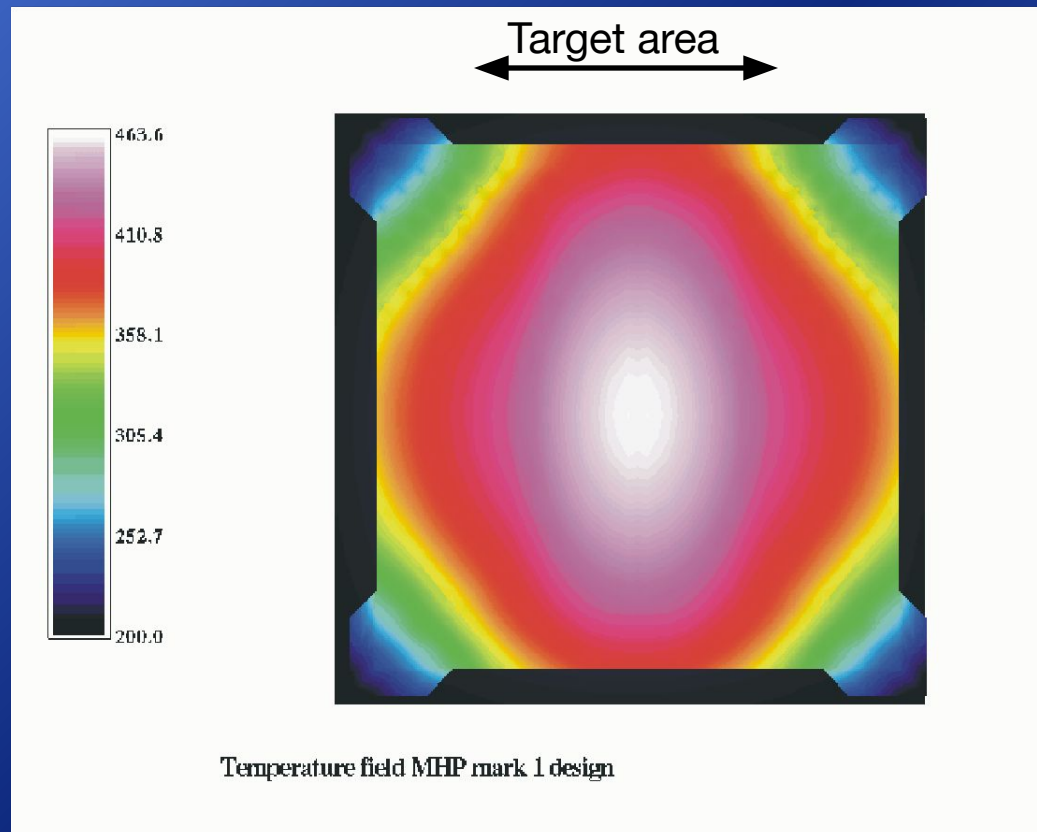
## Температура: МНС 2



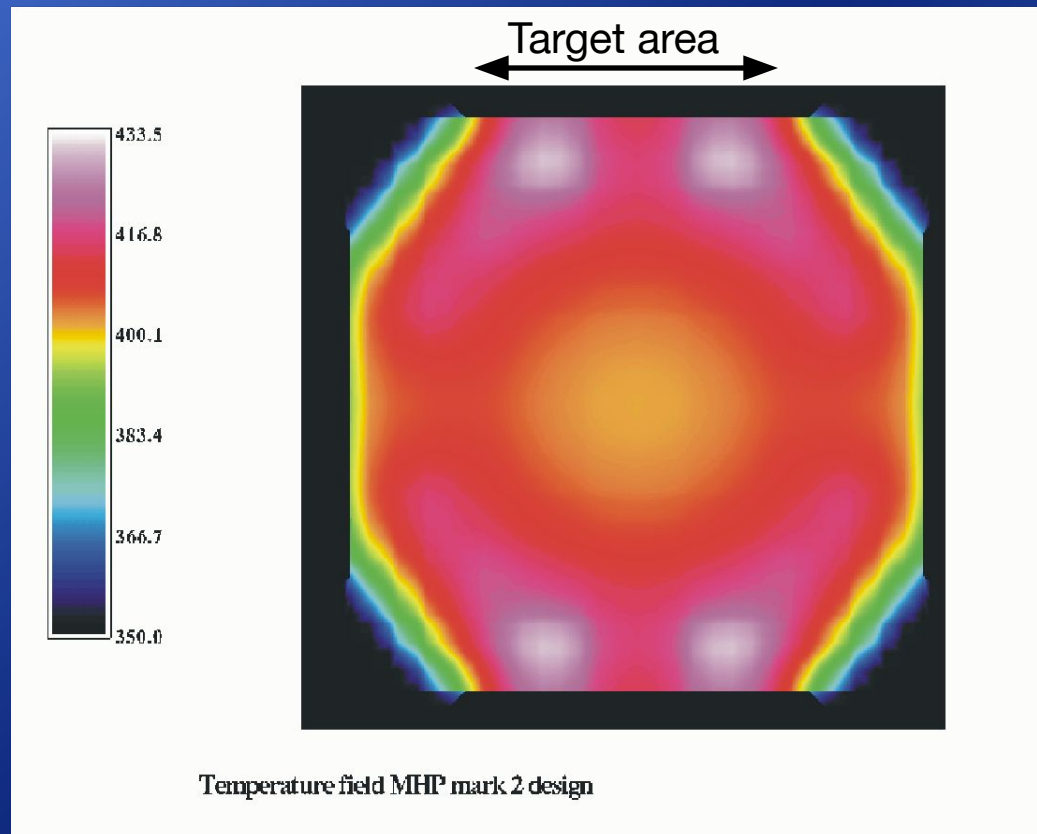
Temperature field MHP mark 2 design



*Target area: Mark 1*  
Целевая область: МНС 1

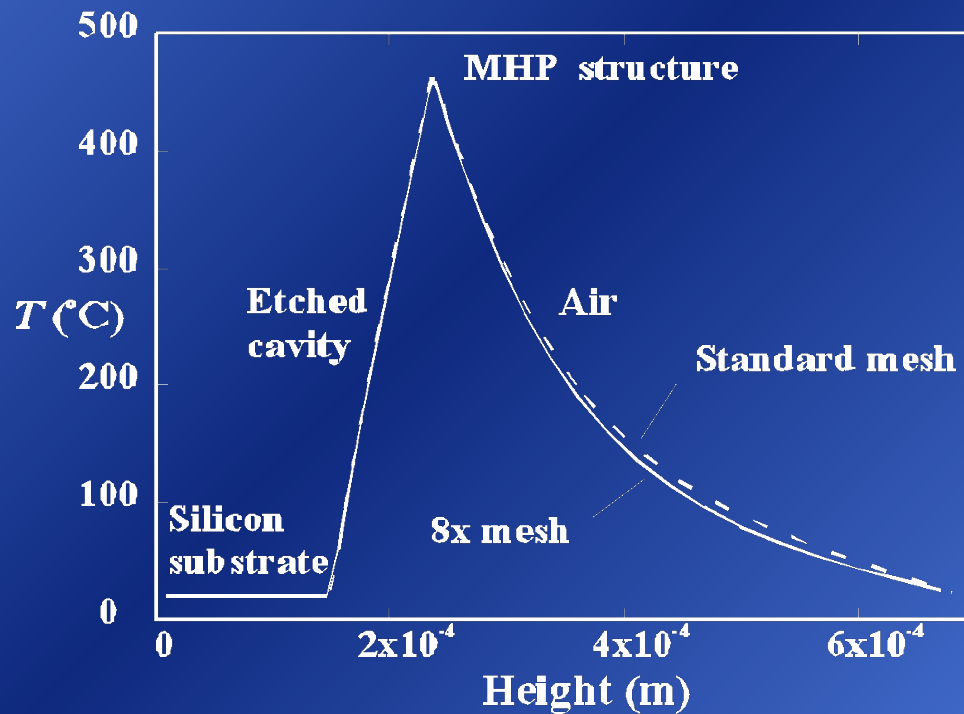


*Target area: Mark 2*  
Целевая область: МНС 2



# *Grid dependence*

## Зависимость Сетки



## *Comments*

## Комментарии

- Mark 1 temperature distribution varies from 223°C to a maximum 463°C at the centre of target. The mean value predicted by the program is 388°C for Q=34mW  
Температура для МНС 1 лежит в пределах от 223°C до максимума 463°C в центре. Средняя рассчитанная температура - 388°C для Q=34mW.
- Mark 2 temperature is a minimum of 315 °C, a maximum of 430°C with a mean value of 403°C. However most of the deviation is confined to 4 'hot spots' away from the central target area (between the platinum contacts). It is much better design overall.  
Температура для МНС 2 имеет минимум 315 °C, максимум 430°C и среднее 403°C.



## *Comments*

# Комментарии

Однако, максимальное отклонение ограничено 4-мя 'горячими точками' далеко от центральной целевой области. Это лучшее схемное решение структуры МНС.

- There does not appear to be much risk of damage to the surrounding circuitry, the substrate is always at near ambient temperatures, due to the high conductivity of silicon and the insulating properties of air.

Риск повреждения окружающей цепи невелик, температура субстрата всегда около температуры окружающей среды из-за высокой теплопроводность кремния и изолирующих свойств воздуха.

# *Electrical conduction*

## Электрическая проводимость

- Tested premise that the source term per unit volume is constant, by computing  $S$  using  
Источник,  $S$ , предполагается постоянным в единице объема и рассчитывается

$$S = \text{grad } \phi \cdot \sigma \text{ grad } \phi$$

- The voltage distribution,  $\phi$ , in the heater is solved using Laplace's equation  
Напряжение,  $\phi$ , в нагревателе рассчитывается по уравнению Лапласа

$$\text{divgrad } \phi = 0$$

# *Electrical conduction*

# Электрическая проводимость

**МНР 1 МНС 1**

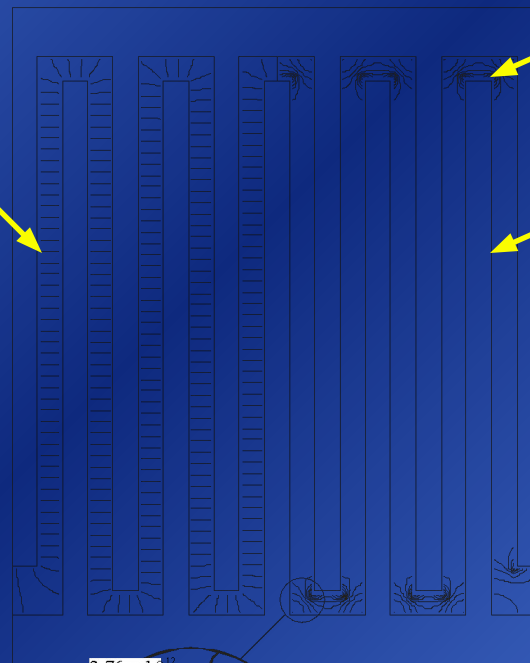
**Linear voltage drop**

**Voltage,  $\varphi$**   
Напряжение

**S not constant**

**S constant**

**Source term, S**  
Источник предполагается



$2.76 \times 10^{12}$

$8.39 \times 10^{12}$

$1.94 \times 10^{12}$

$1.12 \times 10^{12}$

$5.22 \times 10^{12}$

$4.40 \times 10^{12}$

$3.58 \times 10^{12}$

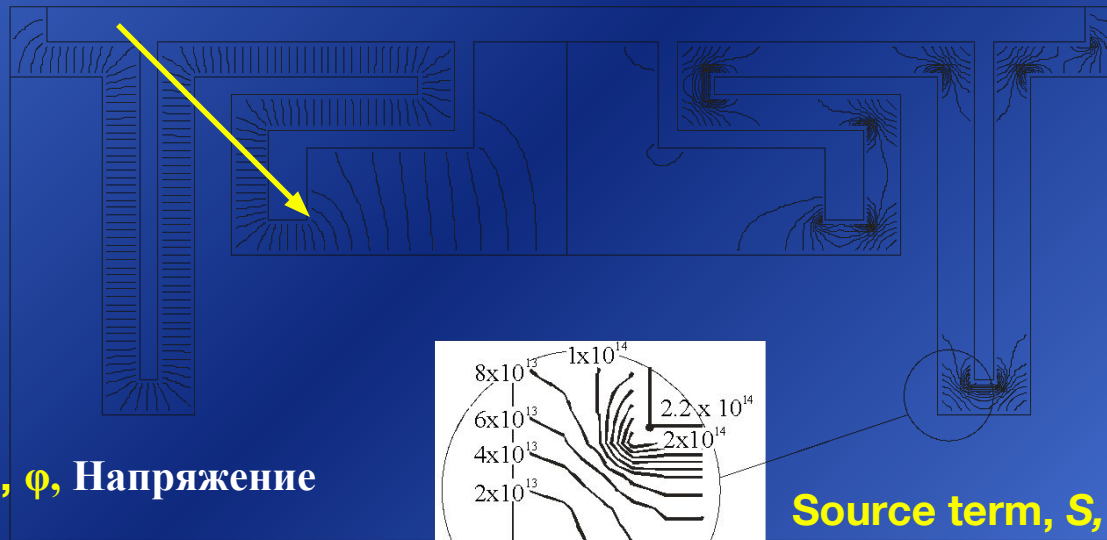
$3.07 \times 10^{11}$

# Electrical conduction

## Электрическая проводимость

Non-linear voltage  
due to area changes

МНР 2 МНС 1



Voltage,  $\phi$ , Напряжение

Source term,  $S$ ,  
Источник  
предполагается



# *Discussion*

## Обсуждение

- For the Mark 1 design the potential gradient is linear over most of the heater and the source term is consistent with the presumed constant value

Для МНС 1 градиент потенциала линеен на большей части нагревателя, что согласуется с предположением о постоянстве источника.

- In the bends however,  $\text{grad } \varphi$  is closely/widely spaced at convex/concave boundaries and there are large local variations in  $S$ , from 90% less to 170% greater than the presumed values.

В сгибах, однако,  $\text{grad } \varphi$  нелинеен около границ и источник,  $S$ , на 90% меньше и на 170% больше, чем предполагаемые значения.



## *Discussion*

## Обсуждение

---

- For the Mark 2 design the potential also varies due to changes in the cross-sectional area  
Для МНС 2 потенциал также изменяется из-за изменений сечения

# *Conclusions*

## ЗАКЛЮЧЕНИЯ

- **A 3-D thermal analysis and design tool was developed to calculate temperature distributions in MHP structures**  
Развит 3-мерный анализ и инструмент для расчета температуры в Кремниевых Микро-нагревательных Структурах
- **Experimental data agree to within 6% of the present calculations**  
Экспериментальные данные согласуются с расчетом в пределах 6%.
- **Analysis showed that the heater source term is constant only in straight zones of constant width**  
Анализ показал, что источник в нагревателе постоянен только в прямых зонах постоянной. толщины



# *Conclusions*

## Заклучения

- **Future work will incorporate the non-linear source term into the heat transfer**  
Будущая работа рассмотрит включение нелинейного источникового члена в расчет. теплопередачи
- **Thermally-induced stress analysis calculations will also be performed**  
Будут выполнены также и расчеты термических напряжений





# *Acknowledgement*

## Подтверждение

- Project resulted from an exchange program of 5th year students from L'Institut Catholique d'Arts et Métiers (France). It is a contribution towards an NRC/NSERC/Industry joint research project with Concordia University and Armstrong Monitoring Corporation
- We should like to thank the following individuals for their assistance in the work:  
David Cheeke, Leslie Landsberger, Oleg Grudin, Radu Marinescu (Concordia),  
Don Singleton, Simon Fafard, Dongfang Yang, Ron Jerome (NRC)