

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**

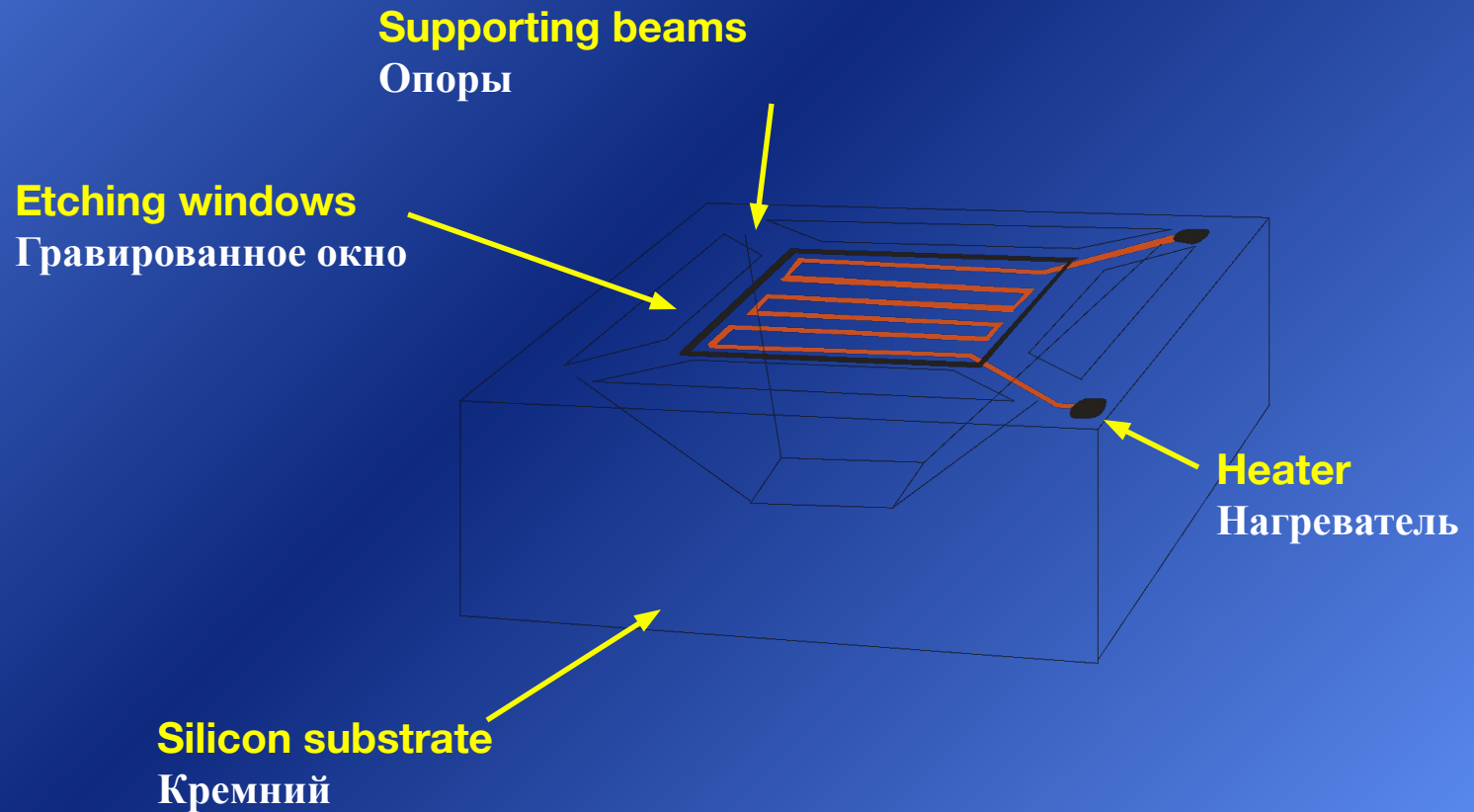
Introduction

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 μm**
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

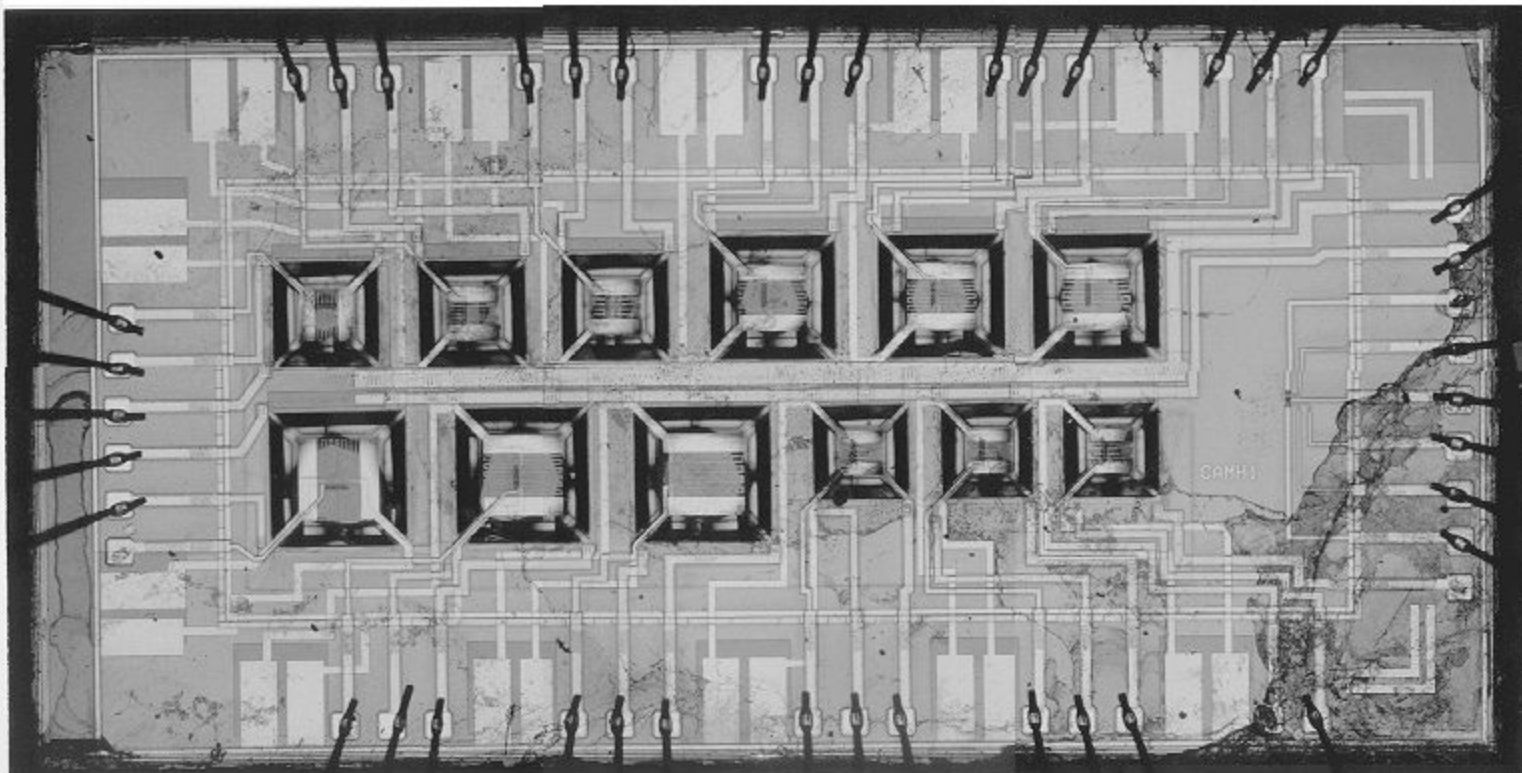
CMOS Процесс



Elevation

Array of MHP structures

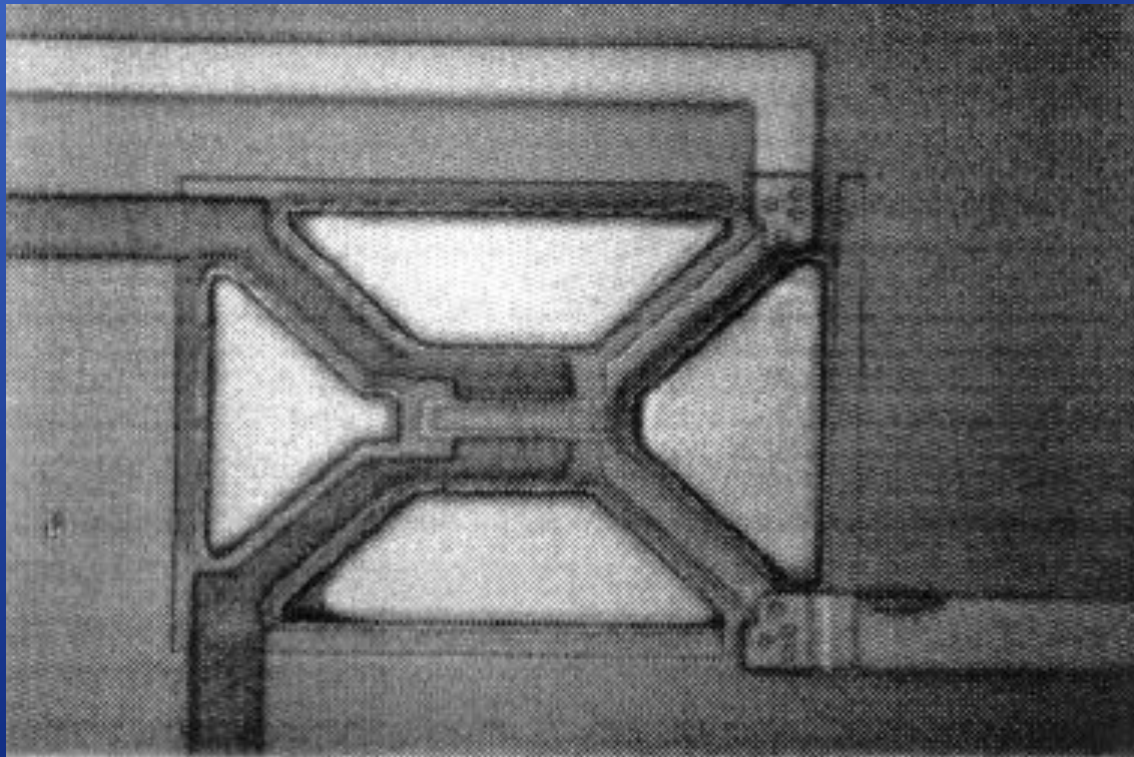
Множество МНС



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

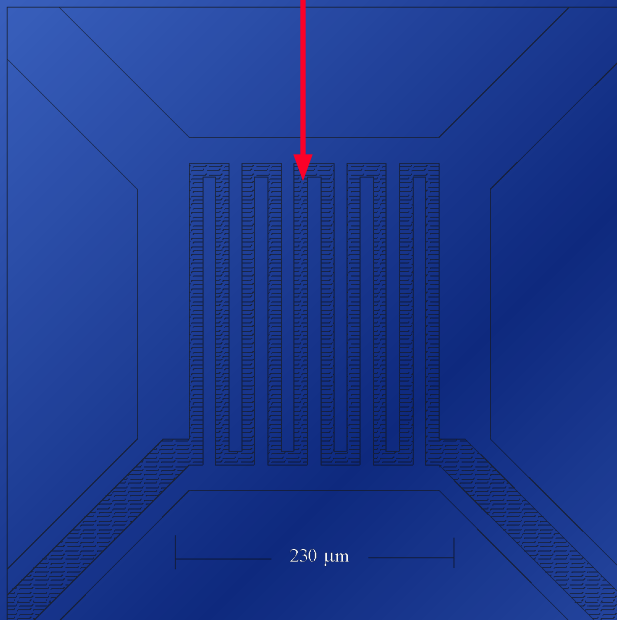
- Experimental work on local temperature distribution difficult, due to micro-geometry, variable optical properties
Микро-размеры усложняют эксперименты
- Therefore embarked on a program of numerical heat transfer analysis
Поэтому, рассмотрен численный анализ теплопередачи
- Software used: PHOENICS multi-block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

Two layers of mark 1 design

Два слоя МНС 1

Polysilicon heater

Поликремний Нагреватель



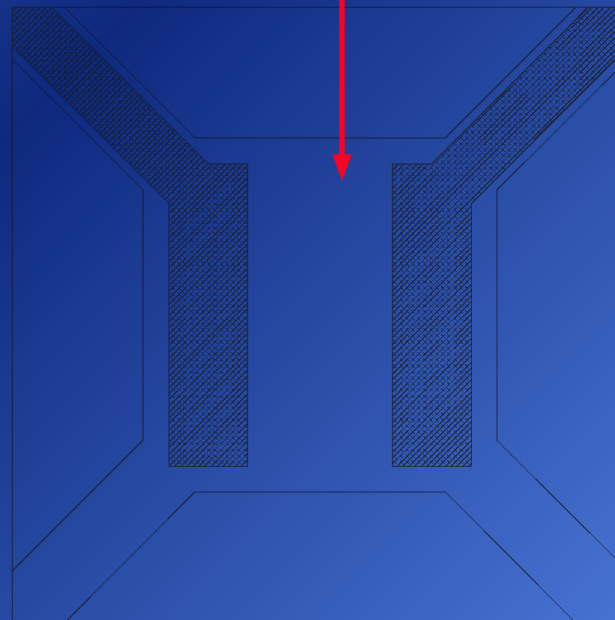
Plan

Heater geometry

Геометрия нагревателя

Target area

Целевая область



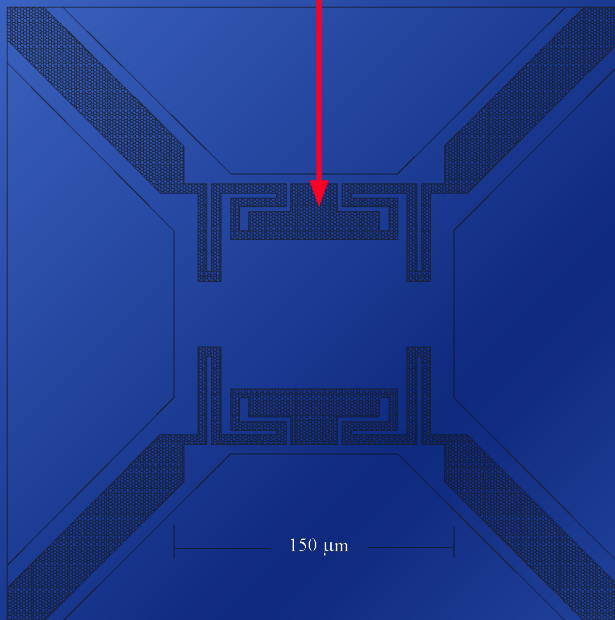
Platinum contacts

Платиновые контакты

Two layers of mark 2 design

Два слоя МНС 2

Polysilicon heater
Поликремний Нагреватель

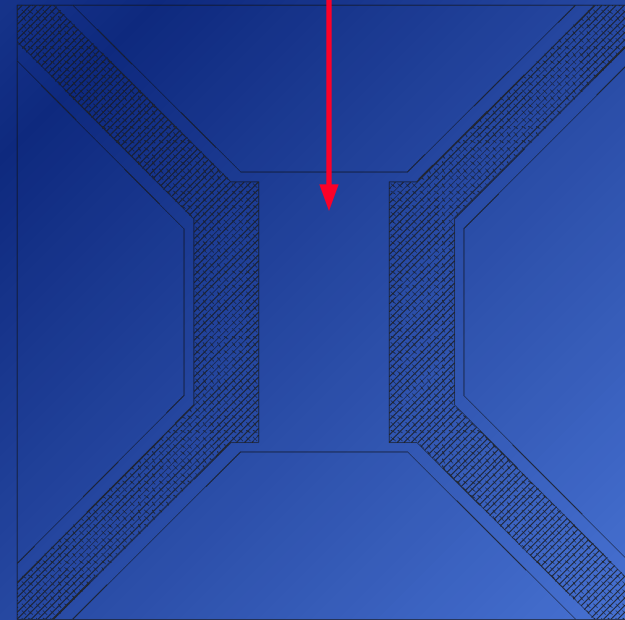


Plan

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

λ variations from layer to layer:

Изменения λ по слоям:

- **Harmonic averaging used.**
Среднегармоническое осреднение

λ variations within layer:

Изменения λ в слое

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

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
многоблочные ВФС

Air Воздух

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

Etched cavity

Гравированная
впадина

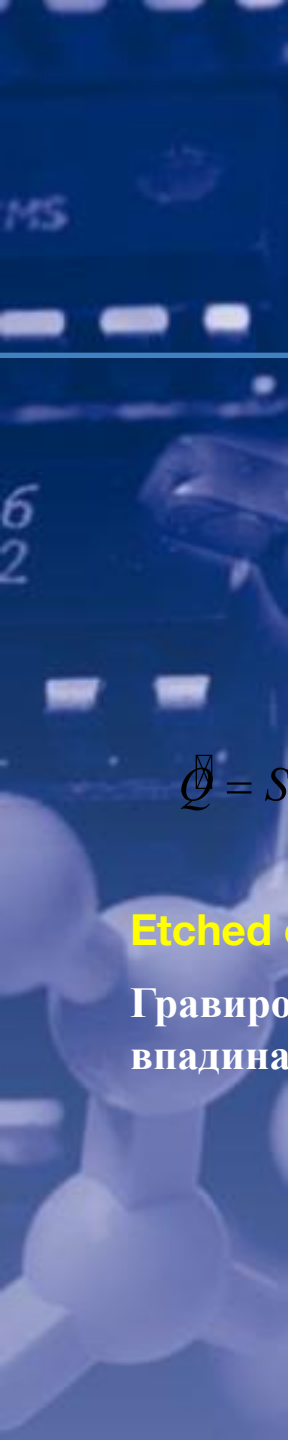
$T=20^{\circ}\text{C}$

Silicon substrate Кремний

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

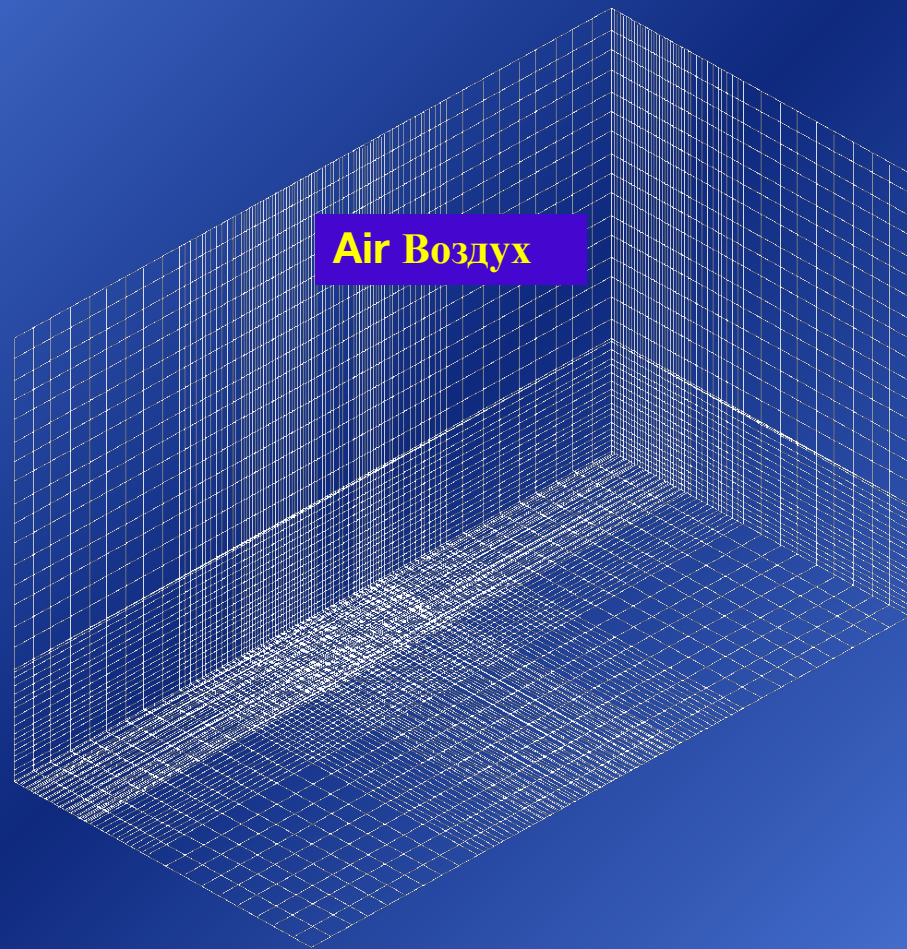
Cells concentrated
within MHP

Ячейки,
сконцентрированные
в пределах МНР



Meshing: Cartesian grid

Сетка: многоблоковые Декартовы



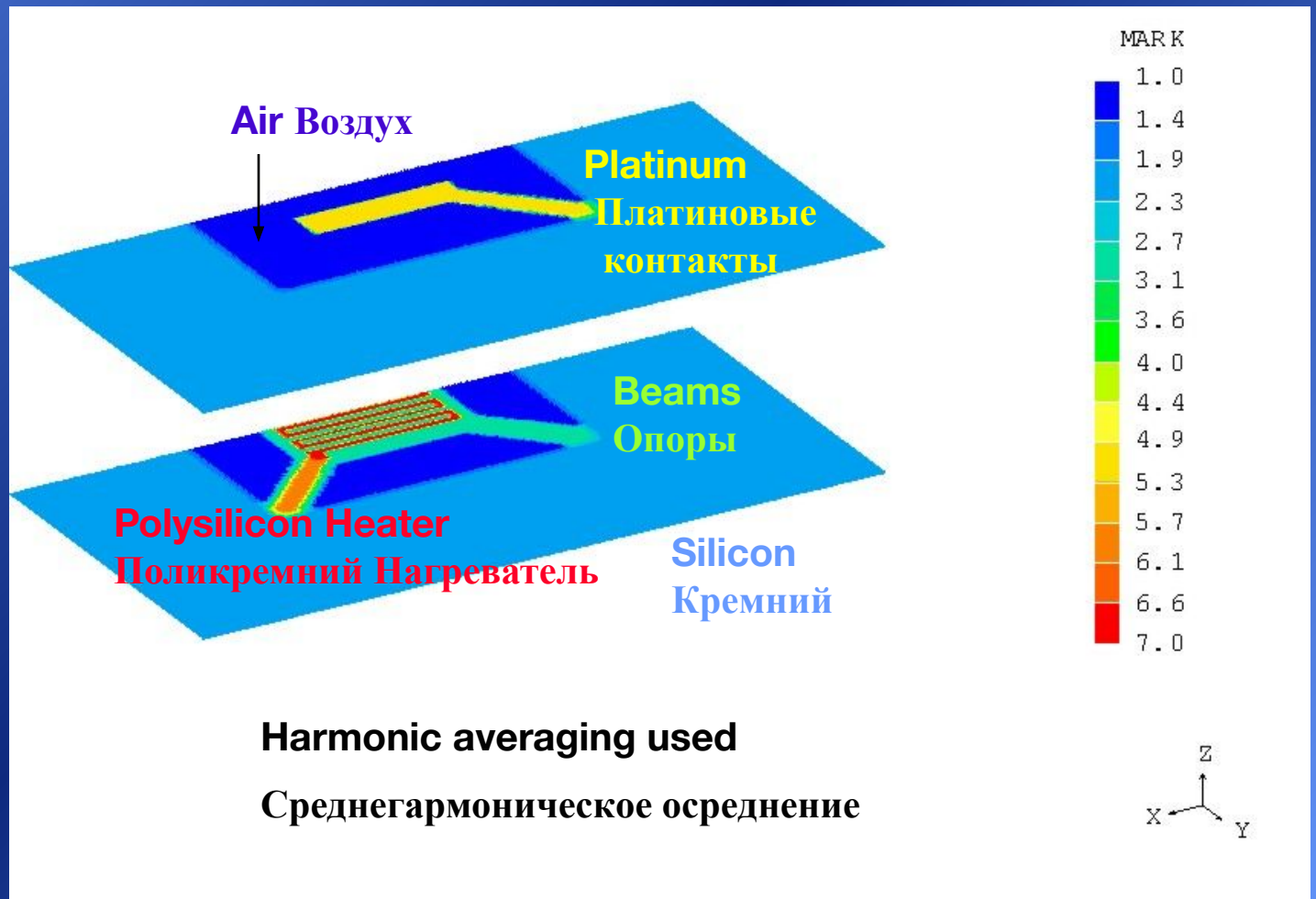
Air Воздух

**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- ϵ sample, probed with a thermocouple. Imaging resolution: 50 μ m

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

Comparison with experimental data

Сравнение с экспериментальными данными

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

Numerical data:

Численные расчеты:

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

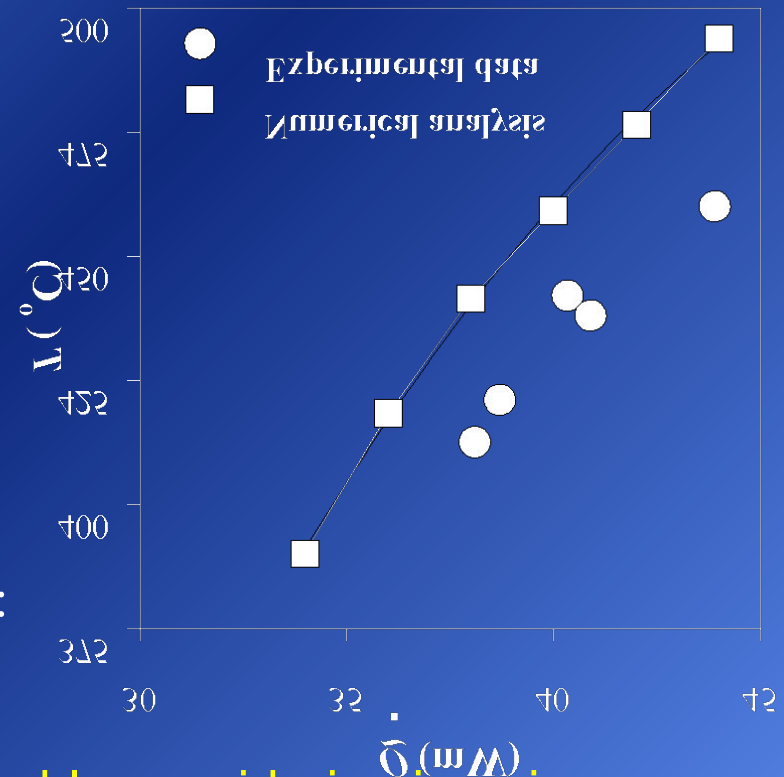
Experimental data:

Экспериментальные данные:

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

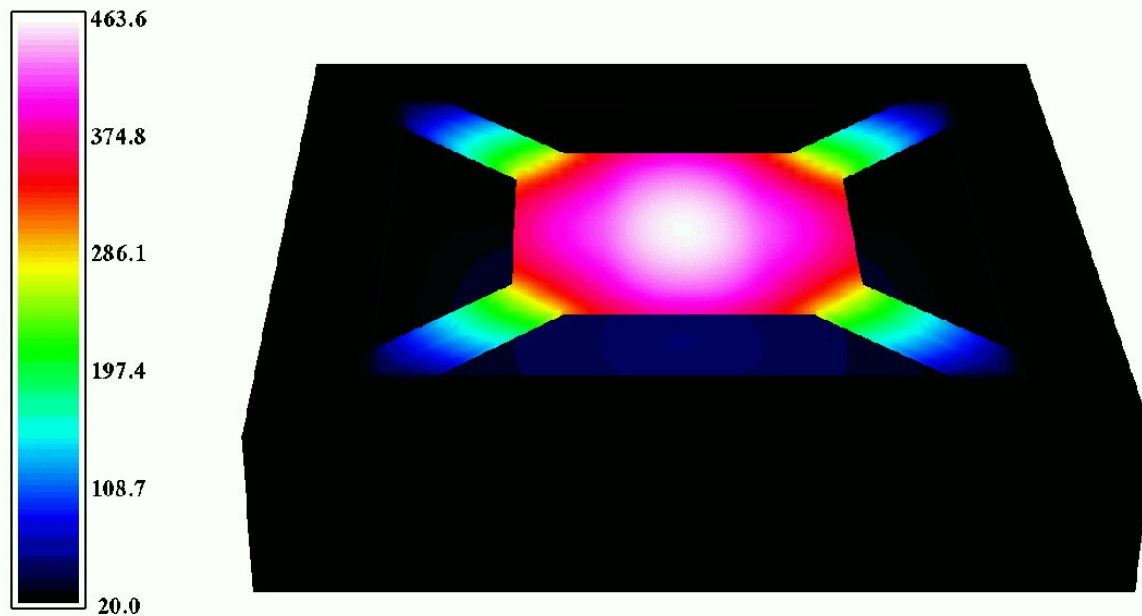
6% difference: Quite reasonable considering imaging resolution only 50 μm for a 250x250 μm sample

Различие 6 %: Весьма приемлимое, отображающее решение только 50 μm для 250x250 μm образца



Temperature distribution: Mark 1

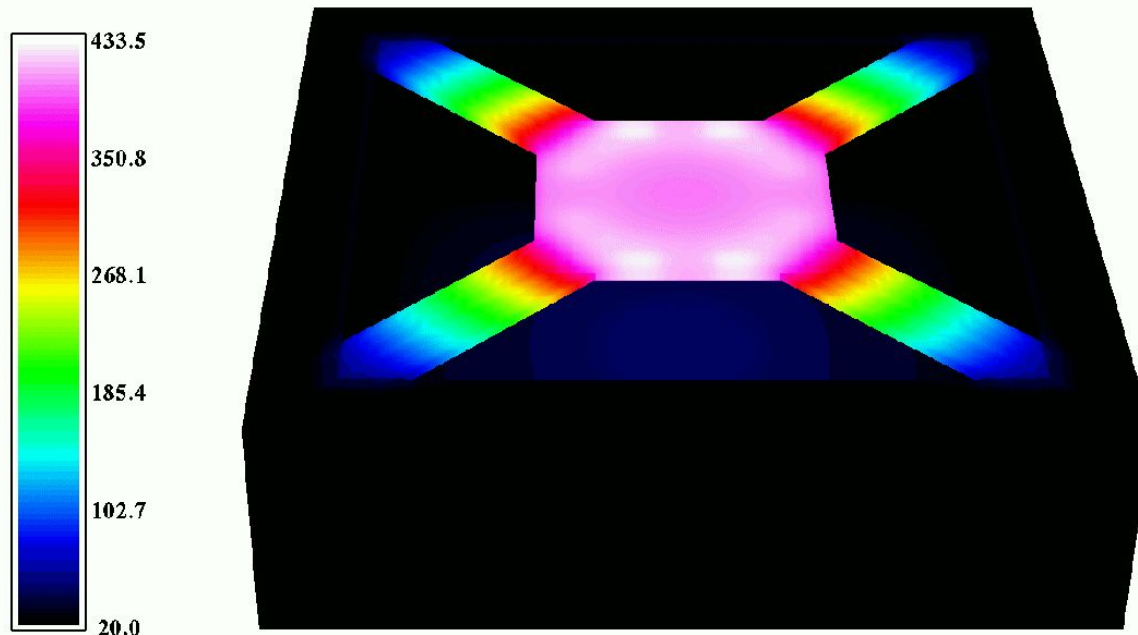
Температура: МНС 1



Temperature field MHP mark 1 design

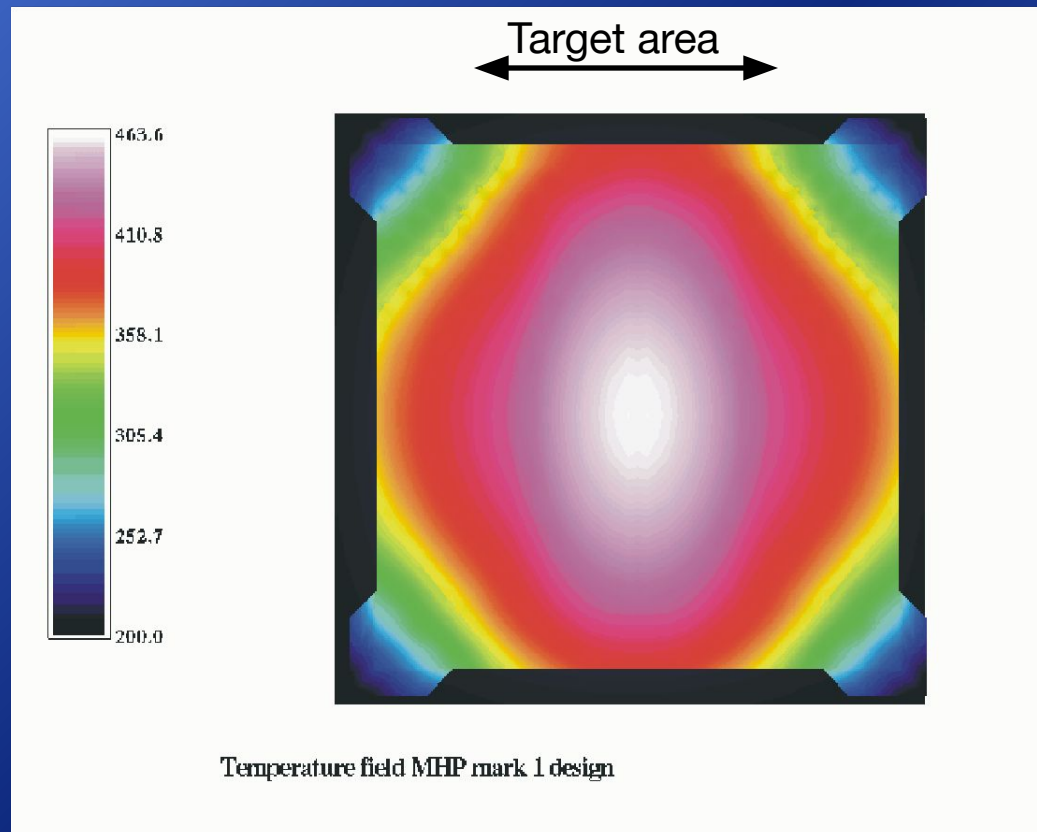
Temperature distribution: Mark 2

Температура: МНС 2

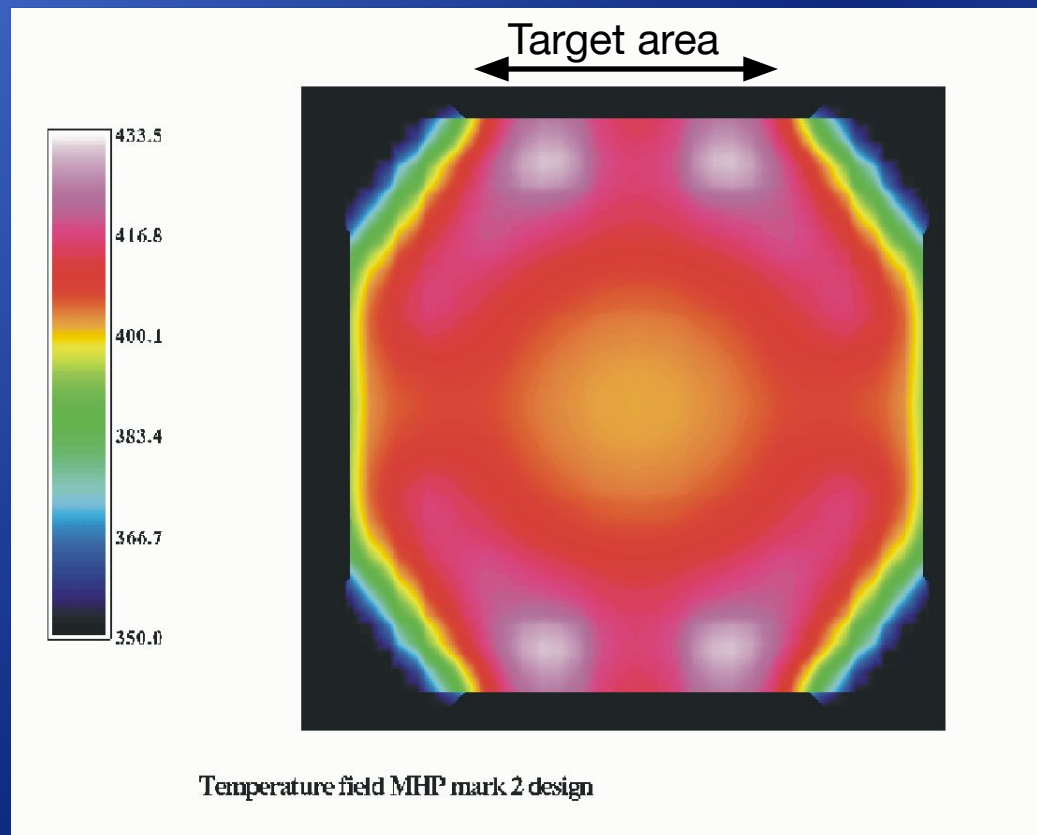


Temperature field MHP mark 2 design

Target area: Mark 1
Целевая область: МНС 1

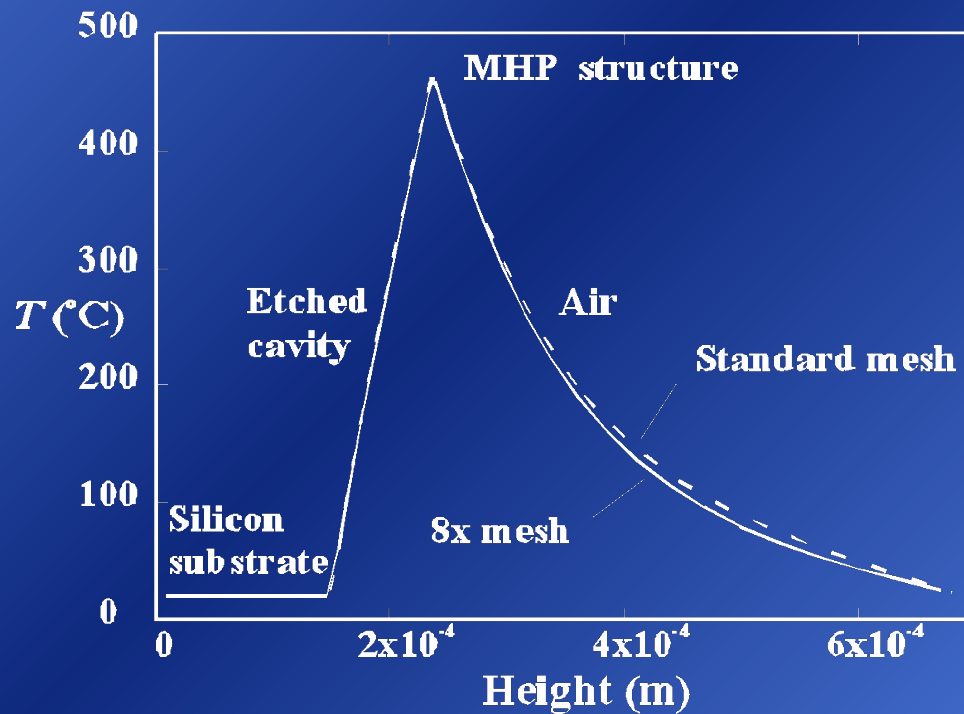


Target area: Mark 2
Целевая область: МНС 2



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, ϕ , in the heater is solved using Laplace's equation
Напряжение, ϕ , в нагревателе рассчитывается по уравнению Лапласа

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

Electrical conduction

Электрическая проводимость

МНР 1 МНС 1

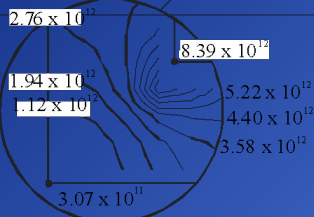
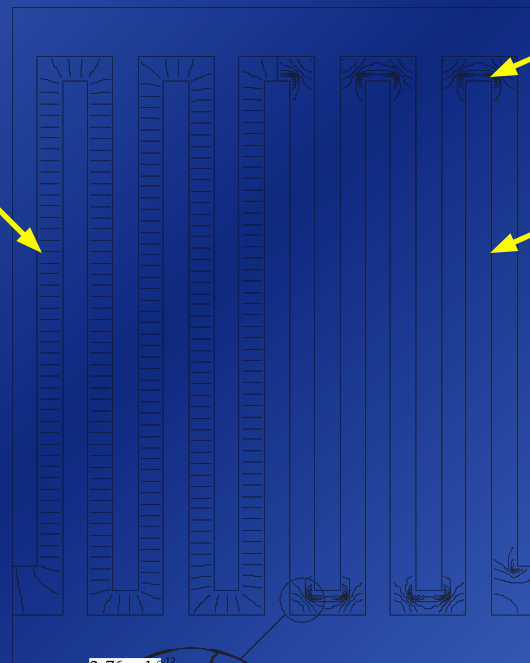
Linear voltage drop

Voltage, φ
Напряжение

S not constant

S constant

Source term, S
Источник предполагается

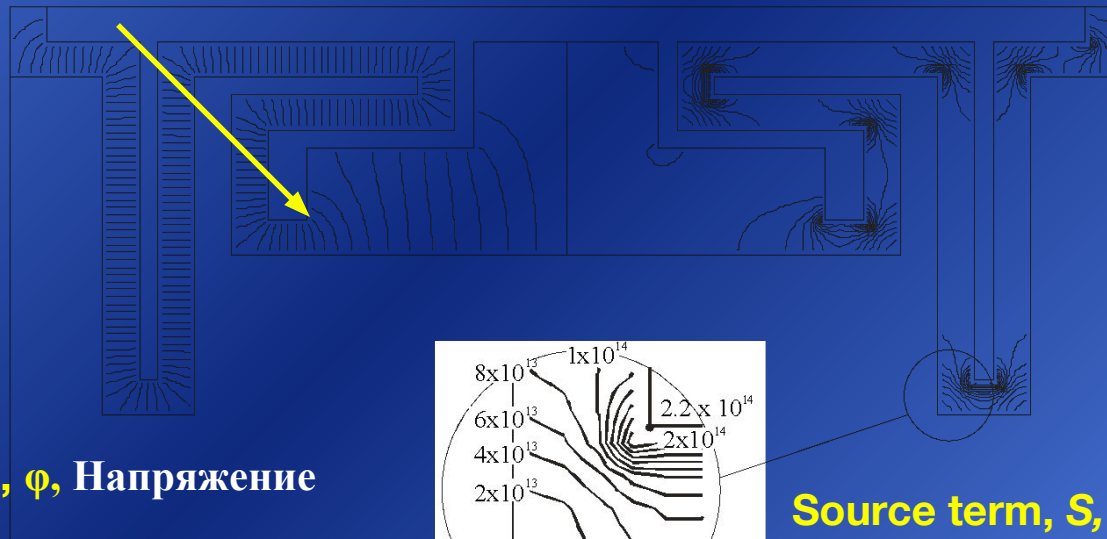


Electrical conduction

Электрическая проводимость

Non-linear voltage
due to area changes

МНР 2 МНС 1



Voltage, φ , 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

Заключения

- **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)