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

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

NRC · CNRC

Introduction Введение

- Microhotplate (MHP) structures are subject of a four year NRC/industry/university collaborative research project MHC = Микро-Нагревательные Структуры являются объектом четырехлетней, NRC/INDUSTRY/UNIVERSITY, совместной научноисследовательской работы
- Fabricated using a CMOS process Изготавливаются с использованием процесса CMOS
- Typical size: 200x200x5 μm
 Типичный размер: 200x200x5 микрон
- Operating temperature is around 500°С
 Операционная температура около 500°С

Schematic of MHP structure Схемное решение структуры MHC





CMOS Process CMOS Процесс



Elevation



Array of MHP structures Множество МНС



Plan



Single MHP structure Отдельная MHC



Plan

Background Постановка задачи

- Two designs considered; Mark 1 and Mark 2 Рассмотрены две конструкции : MHC 1 и MHC 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

<mark>Background</mark> 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 Декартовые сетки

Two layers of mark 1 design Два слоя МНС 1

Polysilicon heater Поликремний Нагреватель

Target area Целевая область



PlanHeater geometryГеометрия нагревателя

230 un

Platinum contacts Платиновые контакты

Two layers of mark 2 design Два слоя МНС 2

Polysilicon heater Поликремний Нагреватель

Т50 µm

Target area Целевая область



Plan Heater geometry Геометрия нагревателя

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.

div λ 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,

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

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



Мeshing: Cartesian grid Сетка: многоблоковые Декартовые

Air Воздух

Cells concentrated within MHP Ячейки, сконцентрированные в пределах MHP

Use of marker to identify different materials Использование маркера, чтобы идентифицировать различные материалы



Ĺ

Experimental work Экспериментальная работа



 Black body emission at λ=875 nm of Mark 1 prototype measured. Calibration achieved with a larger constant-ε sample, probed with a thermocouple. Imaging resolution: 50 mm

Измерено излучение абсолютно черного тела при λ=875 nm для протипа МНС 1 Калибровка термопарами достигнута для образца с большим- ε Разрешение: 50 mm

Сотратият with experimental data Сравнение с экспериментальными данными

$$U = \frac{\cancel{0}}{A(\overline{T} - T_{\infty})}$$

 Numerical data:

 Численные расчеты:

 U=1.71-1.76x10³W/m^{2°}C

 Experimental data:

 Экспериментальные данные:

 U=1.81-1.89x10³W/m^{2°}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: MHC 1



Temperature field MHP mark 1 design



6



Temperature field MHP mark 2 design

Target area: Mark 1 Целевая область: МНС 1



Temperature field MHP mark 1 design

Target area: Mark 2 Целевая область: MHC 2



Temperature field MHP mark 2 design

Grid dependence Зависимость Сетки

6 2



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 расчитанная 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 MHC.

 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 расчитывается

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

 The voltage distribution, φ, in the heater is solved using Laplace's equation Напряжение, φ, в нагревателе расчитывается по уравнению Лапласа

divgrad $\phi = 0$



Electrical conduction Электрическая проводимость

Non-linear voltage due to area changes

MHP 2 MHC 1



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, grad φ 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, grad φ 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)