

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ДАТЧИКА ПОТОКА МЕМБРАННОГО ТИПА

Н.А. Дюжев<sup>1</sup>, Е.Э. Гусев<sup>1</sup>, М.А. Махиборода<sup>1</sup>, М.В. Катеев<sup>1</sup>,  
К.В. Понкратов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

<sup>2</sup>*ООО «Ренишоу»*

bubbledouble@mail.ru

Поступила 19.08.2016

В данной работе было проведено моделирование первичного преобразователя скорости потока газа мембранного типа на основе калориметрического принципа работы. Представлены две методики определения механических напряжений: с помощью профилометра по изгибу пластины и методом комбинационного рассеяния света по сдвигу частоты Рамана. Выполнена оптимизация технологического маршрута формирования мембраны для тепловых датчиков с целью минимизации механических напряжений внутри мембраны. Проведен сравнительный анализ численного моделирования зависимости разности температур терморезисторов при горизонтальном расположении чувствительного элемента с экспериментом. Рассмотрено несколько вариантов конструкции сенсора. Получен результат численного моделирования различных вариантов конструкции датчика. Проведен поиск оптимального положения датчика в трубе измеряемого газового потока для достижения максимальной чувствительности. Показано влияние рабочей среды на работу сенсора. Результаты проведенных исследований позволяют найти оптимальную конфигурацию теплового сенсора и его наилучшее расположение в потоке.

УДК 681.121.832

## **Введение**

В последние два десятилетия в рамках технологии микроэлектронного производства наряду с традиционной планарной технологией изготовления интегральных схем сложилось новое технологическое направление, которое включает в себя определенное разнообразие технологических применений и видов продукции под общим названием микросистемная техника (МСТ). Направление производства микросистемной техники унаследовало от традиционной микроэлектроники базовые технологические приемы,

такие как фотолитография, избирательное травление, лигирование, ионная имплантация и т. п. при этом произошло значительное качественное расширение возможностей и производимых продуктов. В рамках технологии МСТ вытравливаются сверхтонкие пленки и мембраны, миниатюрные трехмерные фигуры, сверхминиатюрные детали машин и механизмов, собираются разнообразные механизмы и микро-электромеханические системы. Технология и производство МСТ оказались актуальными, востребованными, значительно пересекаются с проблематикой нанотехнологий и развиваются высокими темпами в соответствии с законами Мура [1].

Технологии микромеханики, или микро-электромеханических систем (МЭМС) быстро развиваются в настоящее время [2]. Это объясняется во многом тем, что их ключевые преимущества, такие как миниатюрность, функциональность, надёжность, малое энергопотребление, простота интегрирования, востребованы сегодня практически всеми рынками электроники. Области применений МЭМС ранжированы от самых массовых рынков (автомобильного и потребительского) до рынков сложных приборов специального назначения, производимых небольшими партиями: медицинских приборов, военной и аэрокосмической техники.

Один из видов, широко применяемых МЭМС приборов являются измерители потока газов на основе первичного преобразователя, использующего калориметрический метод. Калориметрический метод считается абсолютным методом измерения [3], т.е. значение может быть считано в любой момент. Калориметрический принцип измерения реализуется разными способами и актуален в целом ряде научных и прикладных областей применения - это сканирующая калориметрия [4], дифференциальная сканирующая калориметрия [5,6,7], проточная калориметрия [8], теплопроводящая [9], изотермическая [10], адиабатическая [11].

Основная часть первичного преобразователя это чувствительный элемент, представляющий собой мембрану с расположенными на ней двумя датчиками температуры и находящимся между ними нагревателем. Пороговая чувствительность – это важнейший параметр измерительного преобразователя, критерием которого является определение минимального изменения температуры среды. Поэтому важен подбор материала, из которого будут изготовлены терморезисторы. Материал должен иметь линейно высокий температурный коэффициент сопротивления, а также быть химически инертным, т.е. не взаимодействовать с окружающей средой.

Поток газа изменяет распределение температуры и создает разницу в показаниях, которая пропорциональна скорости этого потока. При этом, чем больше разница в показаниях терморезисторов при определенной скорости потока, тем выше чувствительность прибора.

В работе [2] авторами подробно описан датчик потока подобного типа, разработана математическая модель прибора и проведено моделирование, которое позволило определить изменение профиля распределения тепла вдоль мембраны в зависимости от скорости потока, влияние расстояния между терморезисторами, толщины и материала мембраны на характеристики первичного преобразователя. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными и показавшее хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений параметров.

Для создания математической модели теплового сенсора был использован пакет САПР SolidWorks (Солидворкс — программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства). САПР SolidWorks обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения, работает в среде Microsoft Windows.

Математическая модель описывает трубу диаметром внутреннего сечения 15 мм с помещенным в нее чувствительным элементом на крыле (см. рис.1). Установка датчика на крыло является одним из методов борьбы с неблагоприятным воздействием потока

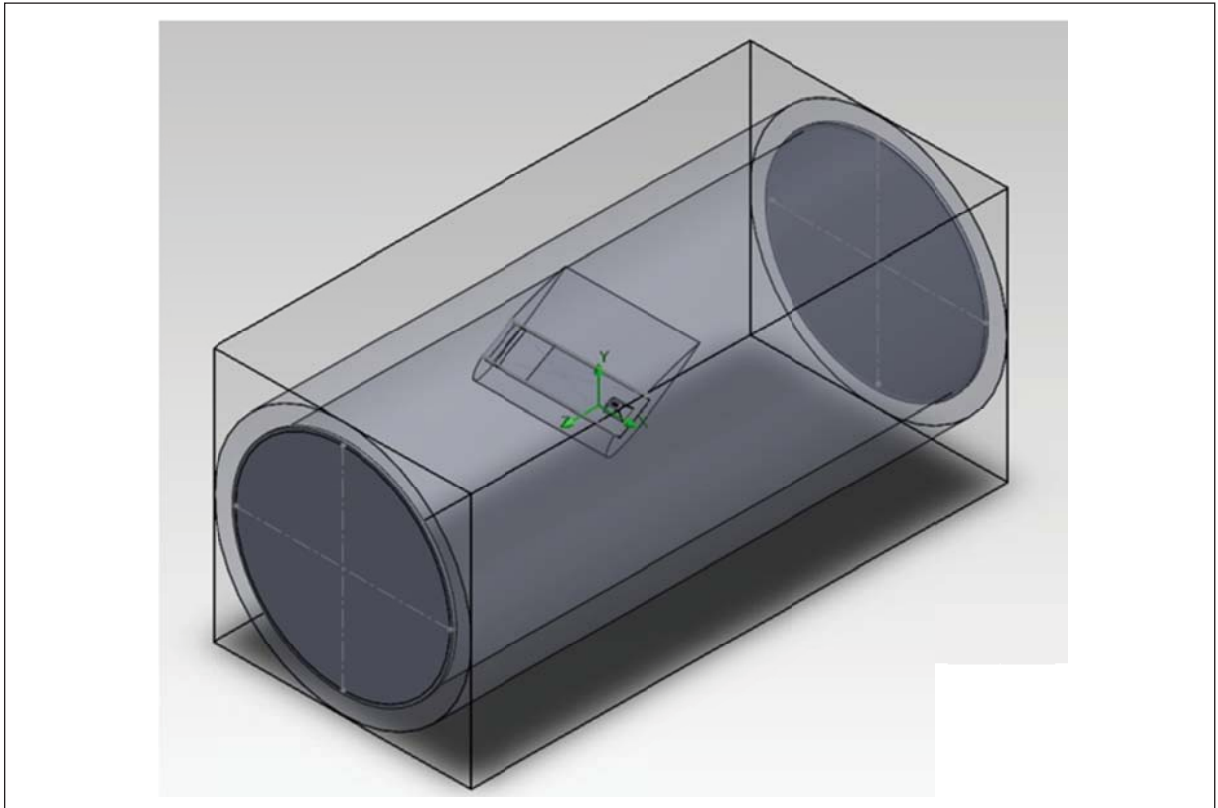


Рис. 1. Расчетная модель первичного преобразователя скорости поток в трубе

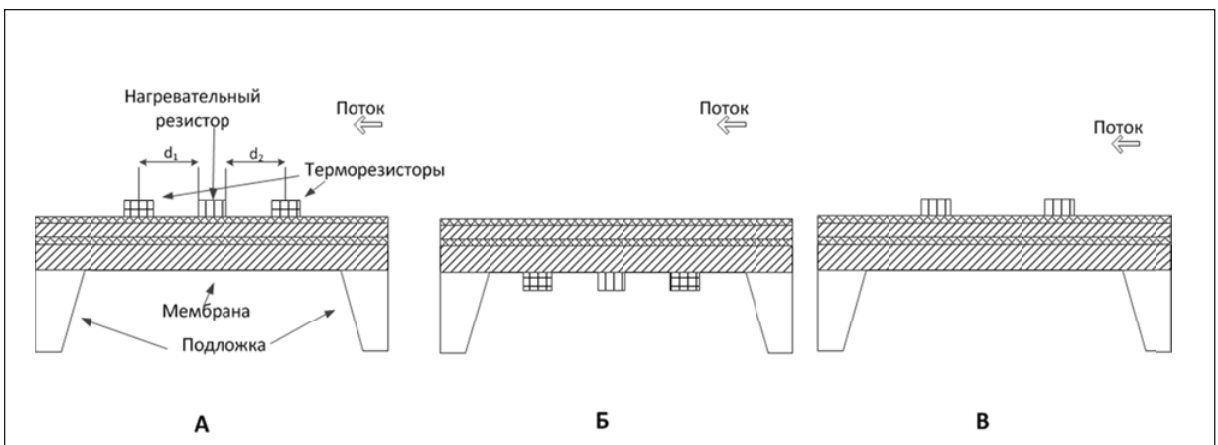


Рис. 2. Схематическое изображение трех конфигураций преобразователя расхода газа. А – «схема с тремя резисторами»; Б - «схема с тремя резисторами на обратной стороне»; В – «схема с двумя нагревателями»

на сенсор. Повышение обтекаемости прибора позволило снизить как сопротивление датчика потоку, так и влияние турбулентных потоков на сенсор. Крыло было создано для эксперимента из ABS-пластика на 3D-принтере. В качестве исходных данных задаются параметры используемых материалов, а также начальные и граничные условия. На нагревательном элементе устанавливается температура в диапазоне от 100 до 120 °С, что было выявлено в ходе эксперимента.

Вместе с тем, представляет несомненный научный и практический интерес установить влияние расположения элементов первичного преобразователя (терморезисторов и нагревателя) относительно мембраны и потока газа.

В данной работе рассматривались три конфигурации чувствительного элемента, которые показаны на рисунке 2.

Первичный преобразователь скорости потока представляет собой кремниевую подложку, на которой формируется микромеханическая диэлектрическая мембрана с расположенными на ней терморезисторами и нагревателем. В качестве материала терморезисторов и нагревателя используется платина в связи с высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и химической стойкостью, что позволяет фиксировать локальные минимальные изменения температуры в доли градуса.

## Численное моделирование

Сенсор представляет собой мост Уитстона с 4 резисторами, расположенными на мембране. Для оптимизации расчетов, т.е. для уменьшения времени расчета и упрощения построения расчетной сетки, были рассмотрены два варианта создания резисторов в Solidworks: 1) 4 резистора сформированы так, как они выглядят на реальных кристаллах (меандры); 2) упрощенная версия, выглядящая как параллелепипеды, площадью с два резистора-меандра.

В случае использования резисторов в форме меандров для обработки сигнала рассматриваются разницы температур между первым и третьим (по порядку слева направо) резисторами или вторым и четвертым. При «сплошных» резисторах мы следим просто за разницей температур между ними. Ниже приведены изображения резисторов и графики расчетов.

Таким образом мы получили результат, говорящий о том, что упрощение геометрии модели вполне обосновано. Далее мы будем рассматривать именно упрощенный вид резисторов.

Для проведения моделирования используется модуль SolidWorks Flow Simulation (семейство дополнительных модулей по газо/гидродинамическим расчетам). Для проверки адекватности данного модуля для нашего эксперимента были проведен теорети-

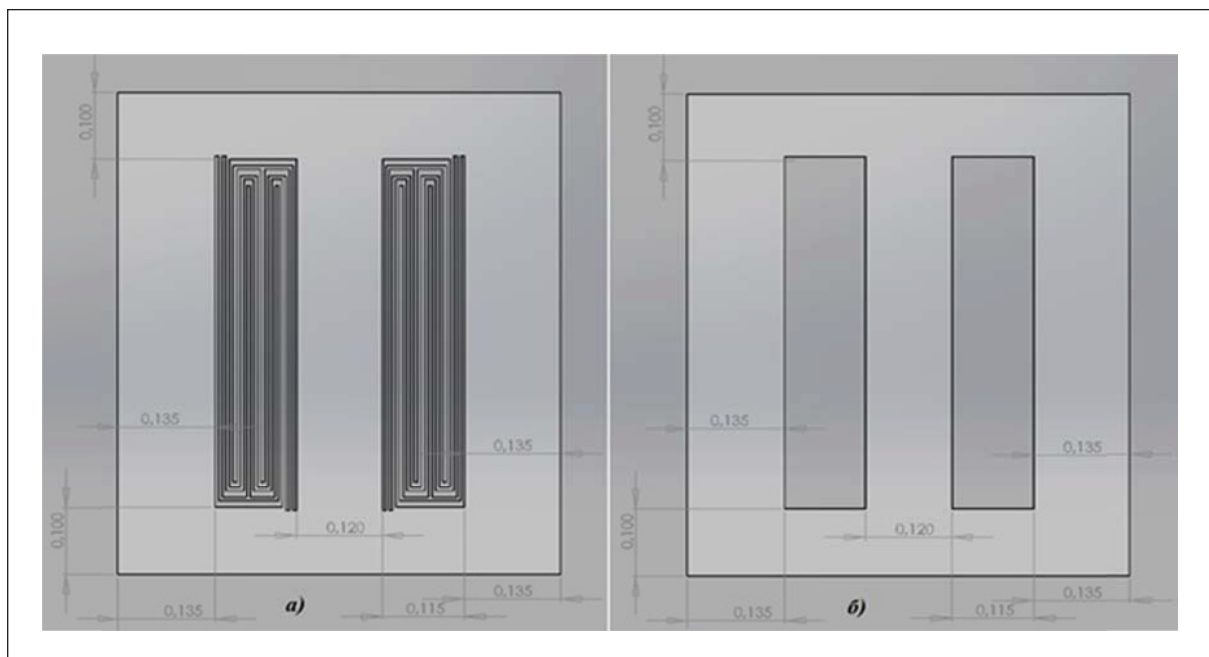


Рис. 3. Изображение резисторов: а) резисторы, которые выглядят как на реальном сенсоре (меандры, 4 штуки); б) упрощенная версия

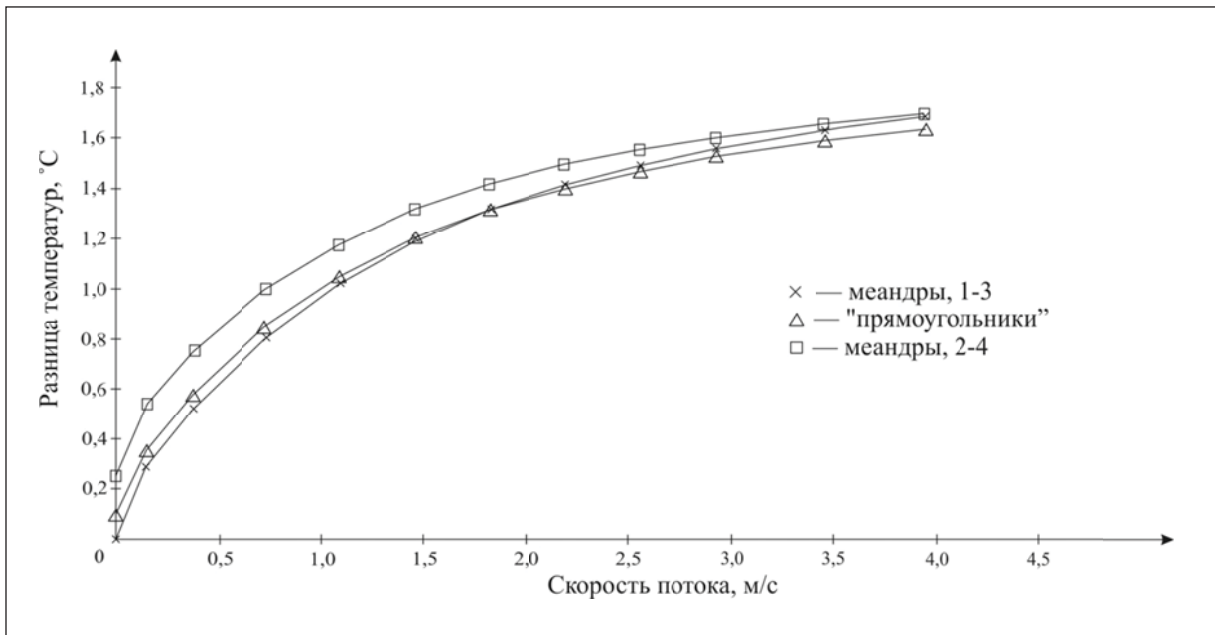


Рис. 4. Графики зависимости разницы температур между резисторами от скорости потока при разных формах резисторов.

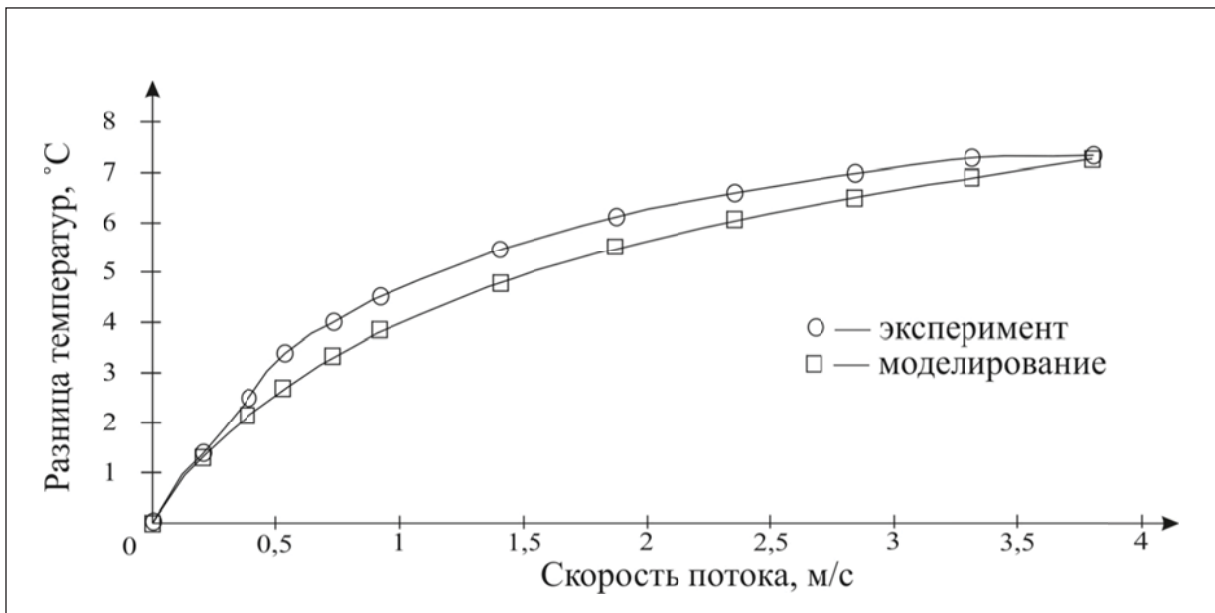


Рис. 5. Зависимость разности температур терморезисторов, горизонтальное положение чувствительного элемента при расстоянии между резисторами 60 мкм при многослойном материале мембраны

ческий опыт по исследованию работоспособности датчика расхода газа конфигурации, пример которой показан на рисунке 5.

Установка датчика на крыло является одним из методов противодействия с неблагоприятным воздействием потока на сенсор [12]. На рисунке 8 представлены результаты моделирования влияния расположения первичного преобразователя на крыло на его чувствительность.

Заметное из графиков повышение чувствительности сенсора вследствие установки датчика на крыло можно объяснить улучшением обтекаемости конструкции, что позво-

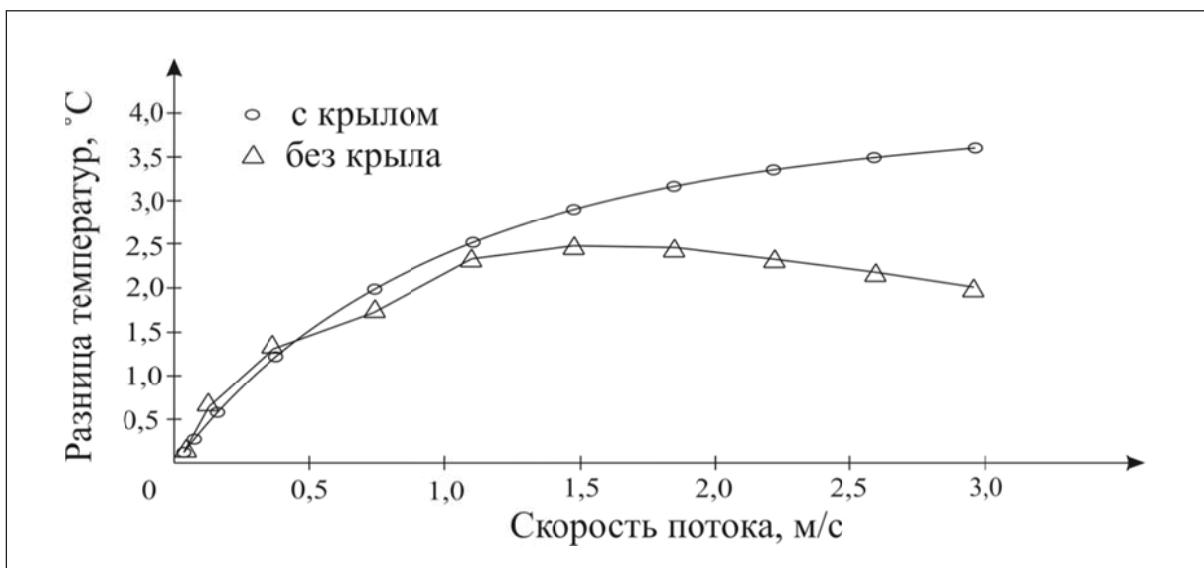


Рис. 6. Зависимость разности температур терморезисторов при конфигурациях с крылом и без крыла

ляет снизить как сопротивление датчика потоку, так и влияние турбулентных потоков на сенсор.

Первичные датчики могут располагаться и на обратной стороне мембраны[13]. Мембрана представляет собой многослойную структуру, состоящую из слоев  $SiO_2/Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4$  или слоя полиимида, и предназначена для уменьшения отвода тепла от нагревателя (в некоторых случаях терморезисторы являются нагревателями, то есть они и нагреватели, и измерительные резисторы). На рисунке 7 представлены результаты моделирования влияния расположения первичного преобразователя относительно мембраны на его чувствительность. Моделирование было проведено при горизонтальном положении сенсора.

Как следует из рисунка 7, для достижения максимальной чувствительности следует использовать сенсор на основе мембраны из полиимида, с нанесенными на обратную сторону терморезисторами. Далее были проведены расчеты с целью поиска такого расположения резисторов на мембране, при котором достигается наибольшая чувствительность сенсора. Результаты моделирования обдува датчика при изменении угла наклона крыла в трубе показаны на рисунке 8.

Из результатов моделирования, приведенных на данном рисунке, следует, что наклон сенсора играет большую роль для увеличения чувствительности датчика. При наклоне более, чем на  $10^\circ$ , чувствительность сенсора возрастает почти в 2 раза. Выбор угла наклона сенсора при проведении эксперимента в  $30^\circ$  объясняется меньшим по сравнению с  $40^\circ$  значением сопротивления датчика потоку при схожих значениях чувствительности.

Потоки газов различаются по скорости, температуре как газа, так и окружающей среды, молекулярному составу и т.д. На рынке сенсоров существует широкий ассортимент устройств. Выбор датчика обусловлен определёнными условиями его эксплуатации. Следующий график показывает, что различия в составе газа влекут за собой отличия в показаниях прибора. Кривые, представленные на рисунке 9, получены в результате нахождения разности температур двух терморезисторов.

Из рисунка 9 видно, что различный молекулярный состав потока обеспечивает качественно схожие кривые графика чувствительности, но отличающиеся по крутизне. Таким образом, выбирая устройство, нужно знать и понимать, с потоками каких ве-

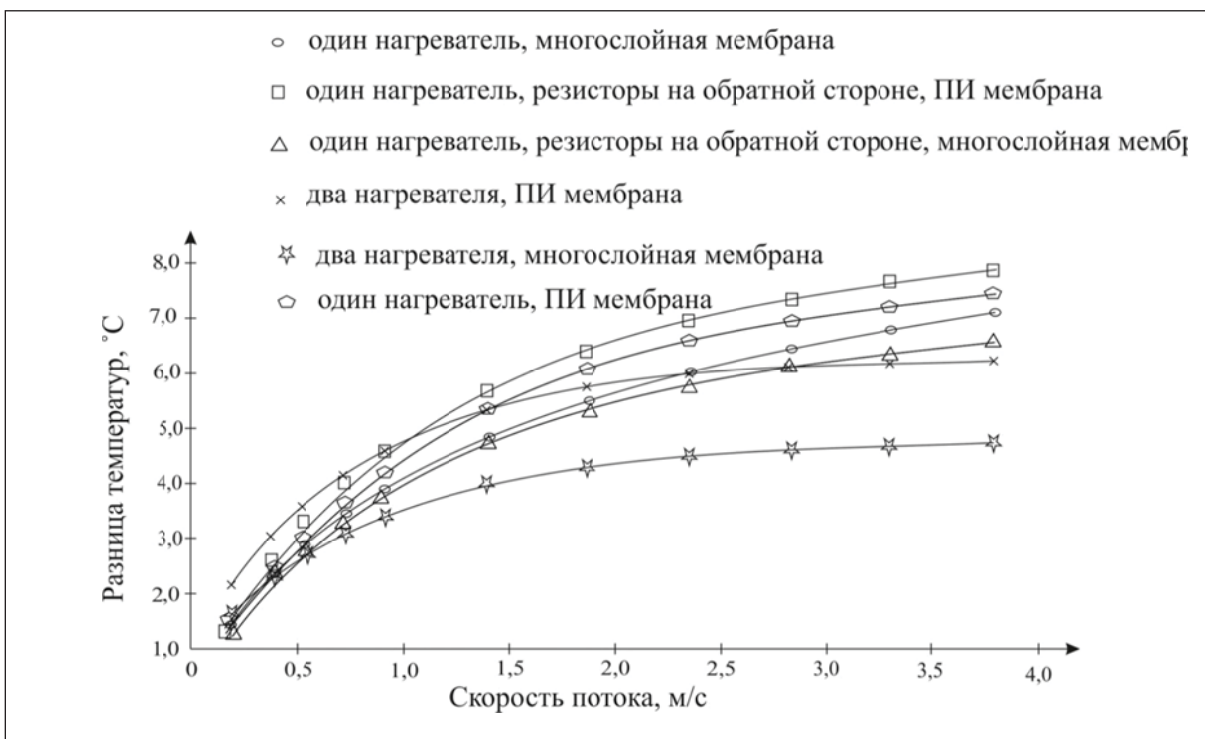


Рис. 7. Зависимость разности температур терморезисторов от конфигурации и материала мембраны

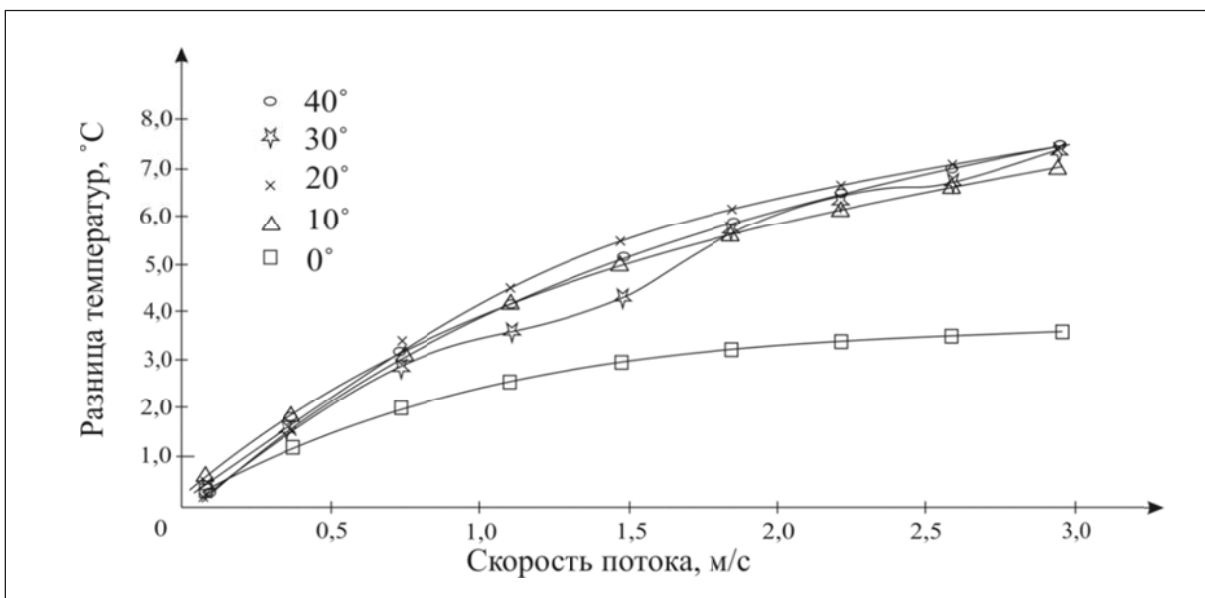


Рис. 8. Зависимость разности температур терморезисторов от угла наклона сенсора в трубе

ществ будет работать сенсор. При моделировании параметр «выделяемая мощность» на резисторах, который отвечает за нагрев, не менялся при переходе от одного газа к другому. Температура резисторов менялась при изменении среды, в которой находится сенсор. Зависимость температуры терморезистора от среды представлена в таблице 1.

Результат работы сенсора может быть как разницей температур между двумя терморезисторами, находящимся на мембране под действием потока газа, так и разницей температуры на одном из терморезисторов, т.е. идет наблюдение за потерей температуры нагревателя при увеличении скорости потока (рис.10).

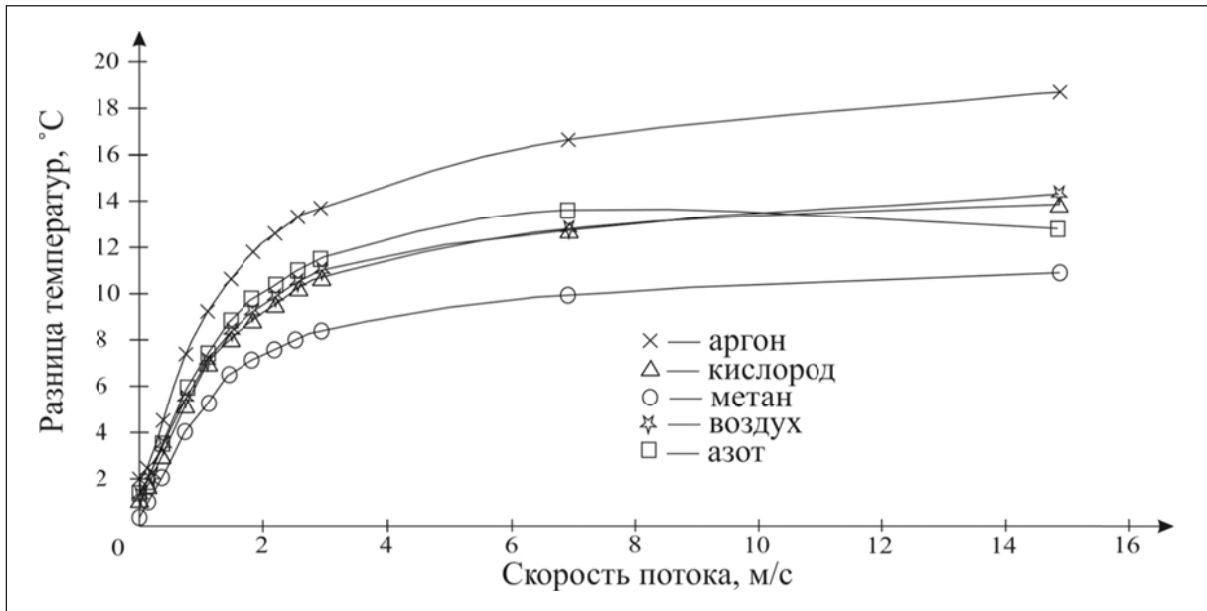


Рис. 9. Зависимость разницы температур терморезисторов от величины скорости потока при различном молекулярном составе среды

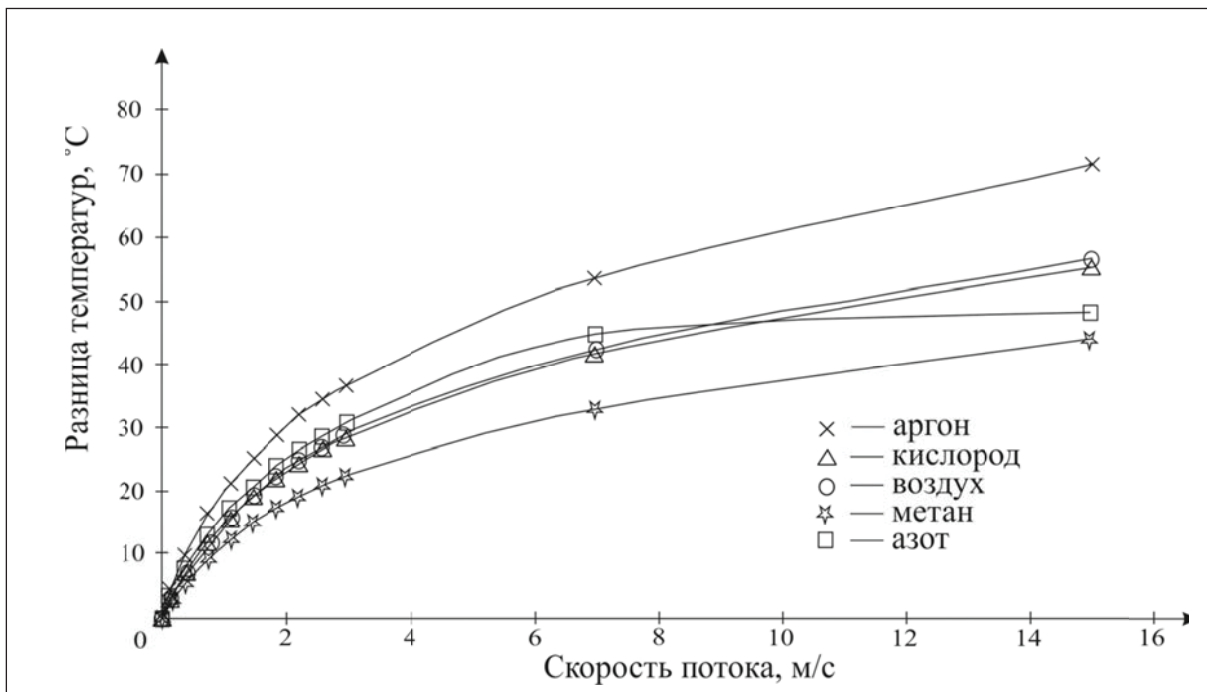


Рис. 10. График потери температуры на одном терморезисторе при увеличении скорости потока с разным молекулярным составом

Таблица 1. Зависимость температуры терморезистора от среды

Скорость потока, м/с	Температура резистора, К				
	Воздух	Азот	Кислород	Метан	Аргон
0	408,3612	412,9586	406,2631	383,4463	443,1589
3	388,5206	391,783	386,6931	368,4721	417,4773



Этот метод зачастую необходим, так как при больших скоростях потока (более 3 м/с) он обеспечивает лучшую чувствительность сенсора, что заметно в сравнении с рис. 9. Для достижения наибольшей точности измерений следует использовать оба метода считывания сигнала: на малых потоках использовать разницу температур, а на больших — метод отслеживания потери температуры на одном резисторе.

## Определение механических напряжений по сдвигу частоты Рамана

При создании МЭМС-структур очень большое влияние на качество получаемых устройств имеют механические напряжения в пластинах кремния. Борьба с напряжениями растяжения/сжатия актуальна и по сей день. Как известно, напряжение в пленках структуры, как правило, приводит к растрескиванию, гофрированию или отслаиванию слоёв [14]. Механические напряжения в образце искривляют поверхность пластины, оказывая влияние в процессе проведения литографии, травления и других технологических операциях производства. Поэтому важно контролировать и управлять механическими напряжениями. Авторы сравнивают методики измерения механических напряжений на примере плёнки плазмохимического нитрида кремния на кремниевой подложке.

Применение спектроскопии комбинационного рассеяния света позволяет решить группу основных задач: определить дальний порядок (кристаллическая или аморфная структура); измерить деформации; идентифицировать состав образца, границы структур и реакции в тонких пленках; выяснить свойства сверхрешеток; определить тип примесей [17].

На пластину Si с кристаллографической ориентацией (100), диаметром 100 мм и толщиной 460 мкм был осажден на лицевую сторону плазмохимический слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 672 нм. Пленка была получена методом химического парового осаждения. Процесс проводился по технологии PECVD, из газовой смеси моносилана  $\text{SiH}_4$ , аммиака  $\text{NH}_3$  и закиси азота  $\text{N}_2\text{O}$  в трубчатом горизонтальном реакторе (ASM-PECVD).

Схема измерения образца показана на рисунке 11.

Измерения проводились на конфокальном Рамановском микроспектрометре inVia Reflex производства компании Renishaw (Великобритания). В качестве источника возбуждения использовался твердотельный лазер 532 нм мощностью 100 мВт. Мощность лазерного излучения на образце составляла 70 мВт.

В процессе измерений, учитывая деформацию пластины, возникла необходимость фокусировки лазерного пучка на промежуточных позициях вдоль радиуса. Поэтому для увеличения точности измерений было предложено всю пластину поделить на 7 локальных областей с шагом около 7 мм, сфокусировавшись на каждой области отдельно. В результате получена зависимость интенсивности сигнала от Рамановской частоты. В процессе обработки графиков была сделана аппроксимация гауссианой экспериментальных данных в программной среде Matlab по всему измеряемому диапазону (от  $-500$  до  $1500 \text{ см}^{-1}$ ), а также в окрестностях области пика Si (от  $500$  до  $540 \text{ см}^{-1}$ ) с более мелким шагом. Было замечено, что диапазон измерений влияет на Рамановскую частоту с максимальной интенсивностью. Вследствие изгиба образца, ухудшается качество фокуса, что влечет за собой достаточно грубый шаг. Однако если анализировать данным подходом все экспериментальные данные, то найти зависимость будет несложно.

Например, для исходной кремниевой пластины, которая будет считаться ненапряженной, положение Рамановского пика  $\omega_0$  составляет  $519.99 \text{ см}^{-1}$ . Далее рассчитаем

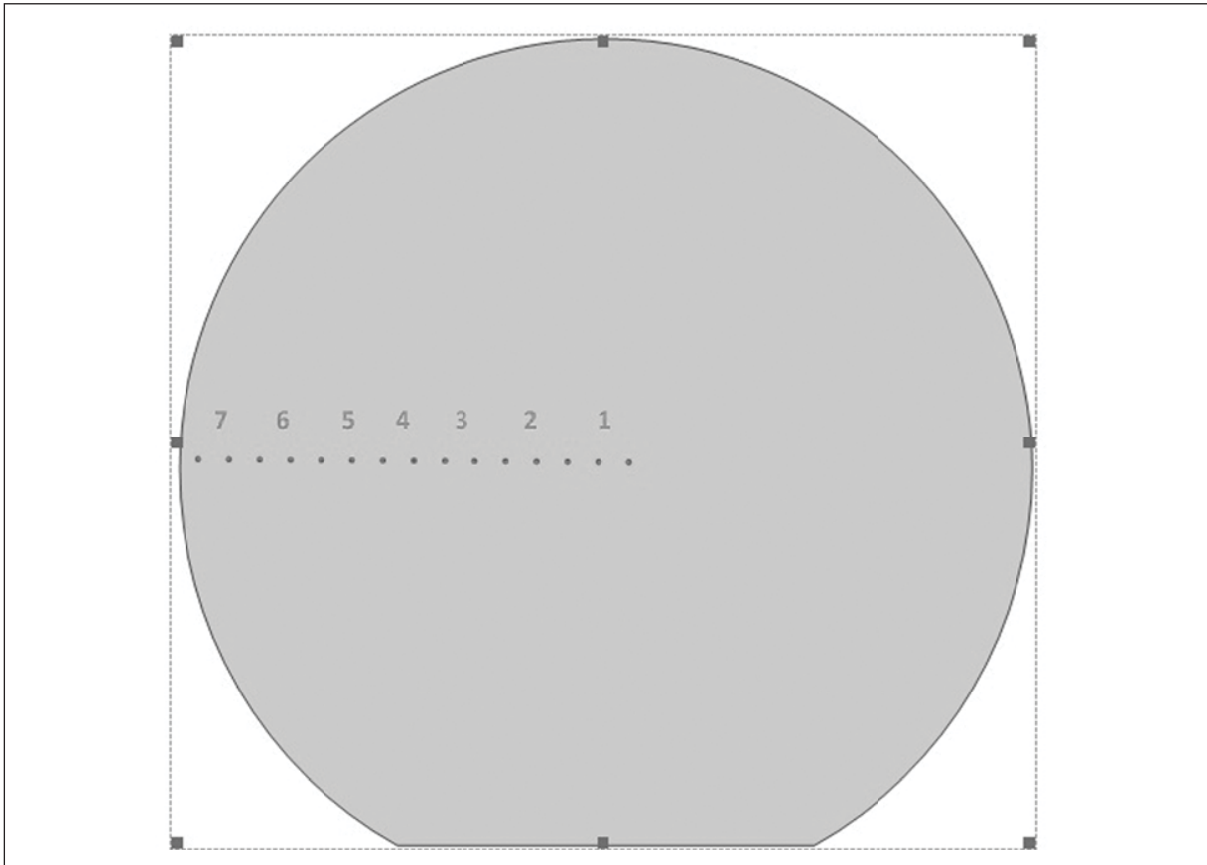


Рис. 11. Схема измерения образца

сдвиг Рамановской частоты для каждой области  $\omega_i$  и вычислим по формуле (1) локальные механические напряжения  $\sigma$  :

$$\sigma = (\omega_i - \omega_0) \cdot K (1)$$

где  $K$  – безразмерный коэффициент.

Как известно [15,16,18], для материала кремния значение  $K$  при одноосном напряжении в направлении [100], сдвиг частоты Рамановского излучения на  $1 \text{ см}^{-1}$  соответствует величине напряжений 500 (МПа). Распределение сдвига Рамановской частоты исследуемого образца представлено на рисунке 12.

Далее показана карта распределения механических напряжений в плёнке нитрида кремния (рис.13).

Из рисунка 13 можно заключить, что в плёнке нитрида кремния присутствуют отрицательные (сжимающие) напряжения в диапазоне от 310 до 400 (МПа). Причём, в центральной области пластины величина напряжений по модулю минимальна.

### Определение механических напряжений по изгибу пластины

Методика включает проведение измерений с помощью бесконтактного оптического профилометра и интерпретацию полученных с него данных: расчет величины радиуса кривизны поверхности исходя из модельного представления, а также последующее вычисление значения механических напряжений в локально выбранной области. Достигается наглядное представление полученных данных.

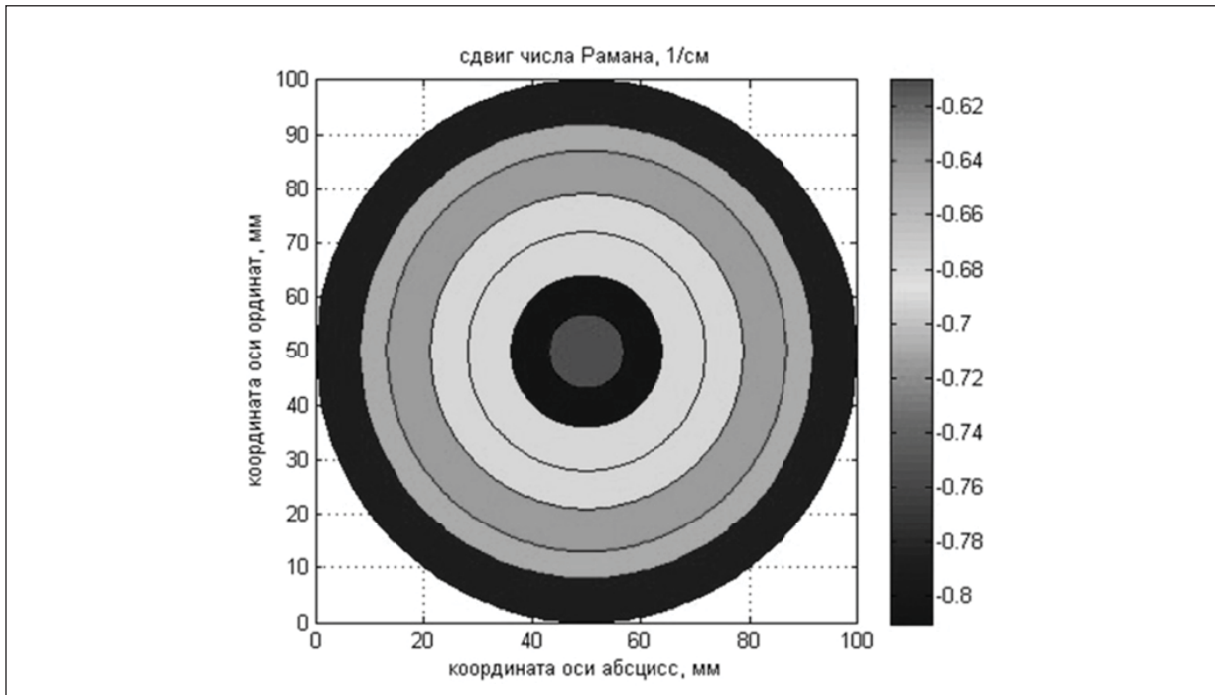


Рис. 12. Распределение сдвига Рамановской частоты на образце  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  диаметром 100 мм

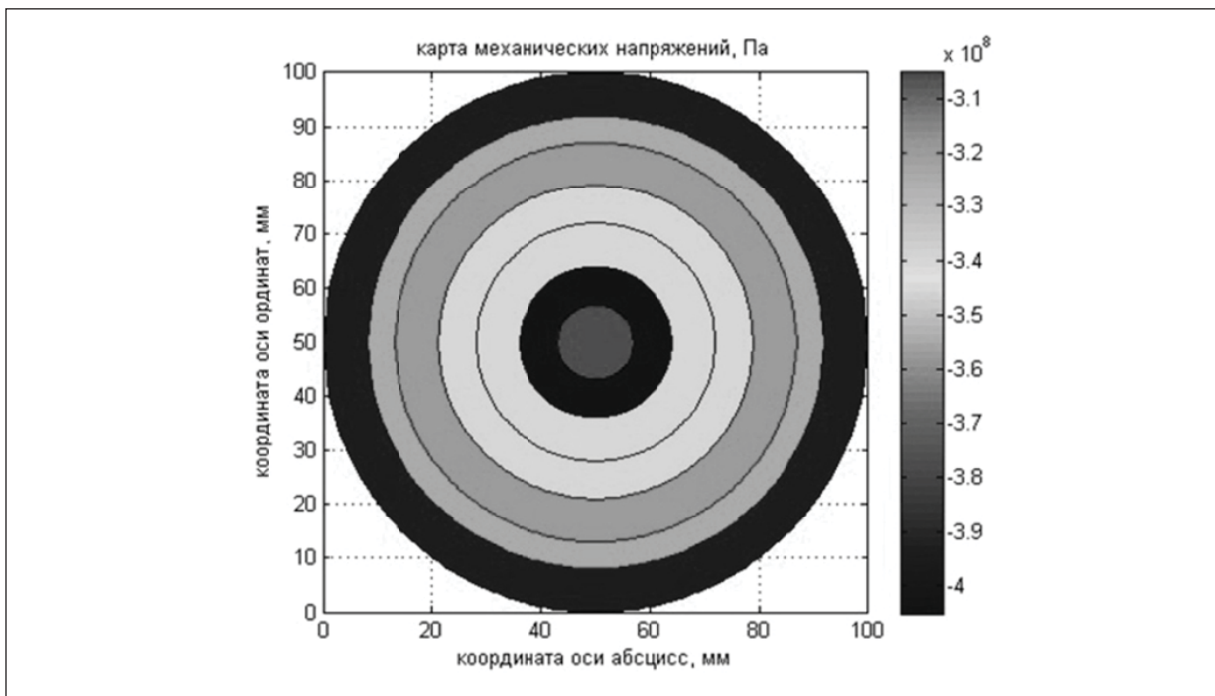


Рис. 13. Карта распределения механических напряжений в плёнке нитрида кремния

Первым шагом проанализирована геометрия поверхности рабочей пластины. Рассмотрен рельеф поверхности (рис. 14).

Проведены тривиальные геометрические преобразования, в результате которых получена формула (2) для расчёта радиуса кривизны поверхности  $R$  :

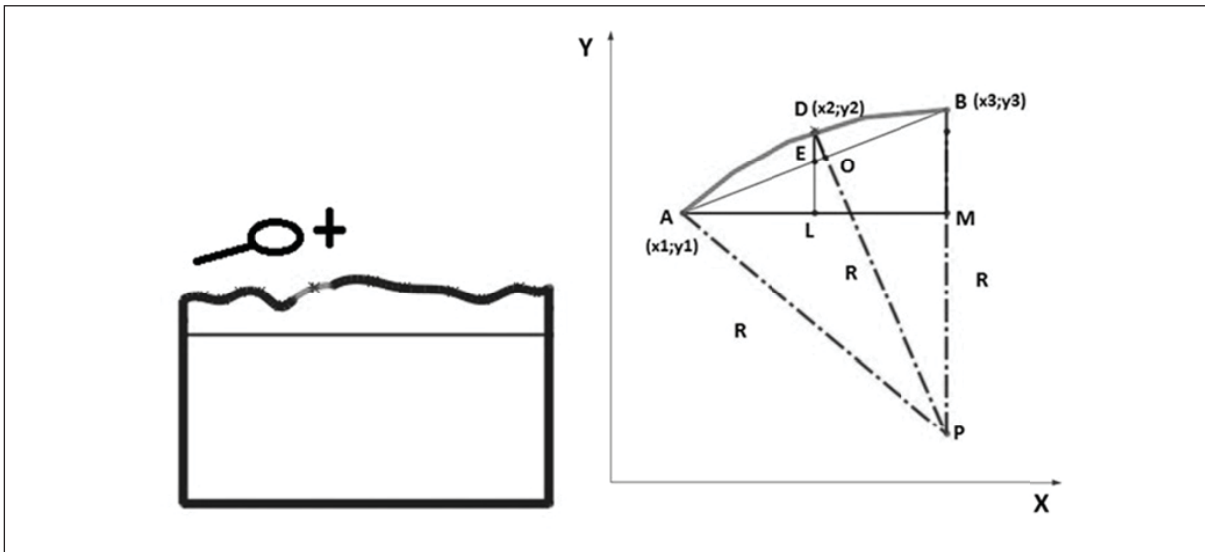


Рис. 14. Геометрия поверхности пластины для расчёта радиуса кривизны

$$R = \frac{\left\{ \frac{(x_2 - x_1) \cdot (y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1) \cdot \sin(\arctg \frac{(x_3 - x_1)}{(y_3 - y_1)})} \right\}^2 + \left\{ (y_2 - y_1) - \frac{(x_2 - x_1) \cdot (y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} \cdot \sin \left\{ \arctg \frac{(x_3 - x_1)}{(y_3 - y_1)} \right\} \right\}^2}{2 \cdot \left\{ (y_2 - y_1) - \frac{(x_2 - x_1) \cdot (y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} \cdot \sin \left\{ \arctg \frac{(x_3 - x_1)}{(y_3 - y_1)} \right\} \right\}} \quad (2)$$

Достоверность формулы (2) проверена в программной среде SolidWorks. Построена дуга ADB с произвольными значениями координат точек  $(x_i, y_i)$ . Далее произведен расчет радиуса R по формуле (2). После этого проведены отрезки BP, AP длиной R таким образом, что длина отрезков AP, DP и BP одинаковая. Замкнутость полученного контура ADBP доказывает достоверность формулы (2).

Вторым шагом было составление алгоритма вычисления величины локального радиуса кривизны поверхности по формуле (2) в программной среде Matlab [19].

Алгоритм состоит из нескольких этапов. На первом этапе была найдена полиномиальная функция, которая максимально корректно описывает полученный рельеф. После проводится сравнение значения двух ближайших точек рельефа. Если происходит возрастание функции, описывающей рельеф поверхности, то производится вычисление по формуле (2). В случае убывания знак рассчитанной величины изменяется на противоположный. В завершении величины радиусов подставляются в формулу (1) для расчета механических напряжений.

Заключительным этапом программирования являлось составление алгоритма вычисления механических напряжений по формуле (1), исходя из рассчитанных величин радиуса кривизны поверхности.

Далее проведено измерение рельефа в двух направлениях: параллельно и перпендикулярно базовому срезу до и после осаждения. Определение рельефа поверхности проводилось с помощью бесконтактного оптического профилометра Veeco Wyko NT9300.

Результаты измерения рельефа поверхности в параллельном базовому срезу направлении представлены на рисунке 15.

Из представленного графика можно сделать заключение, что после осаждения пленки нитрида кремния пластина стала более изогнутой. Учитывая, что в исходной пластине монокристаллического кремния с ориентацией (100) присутствуют

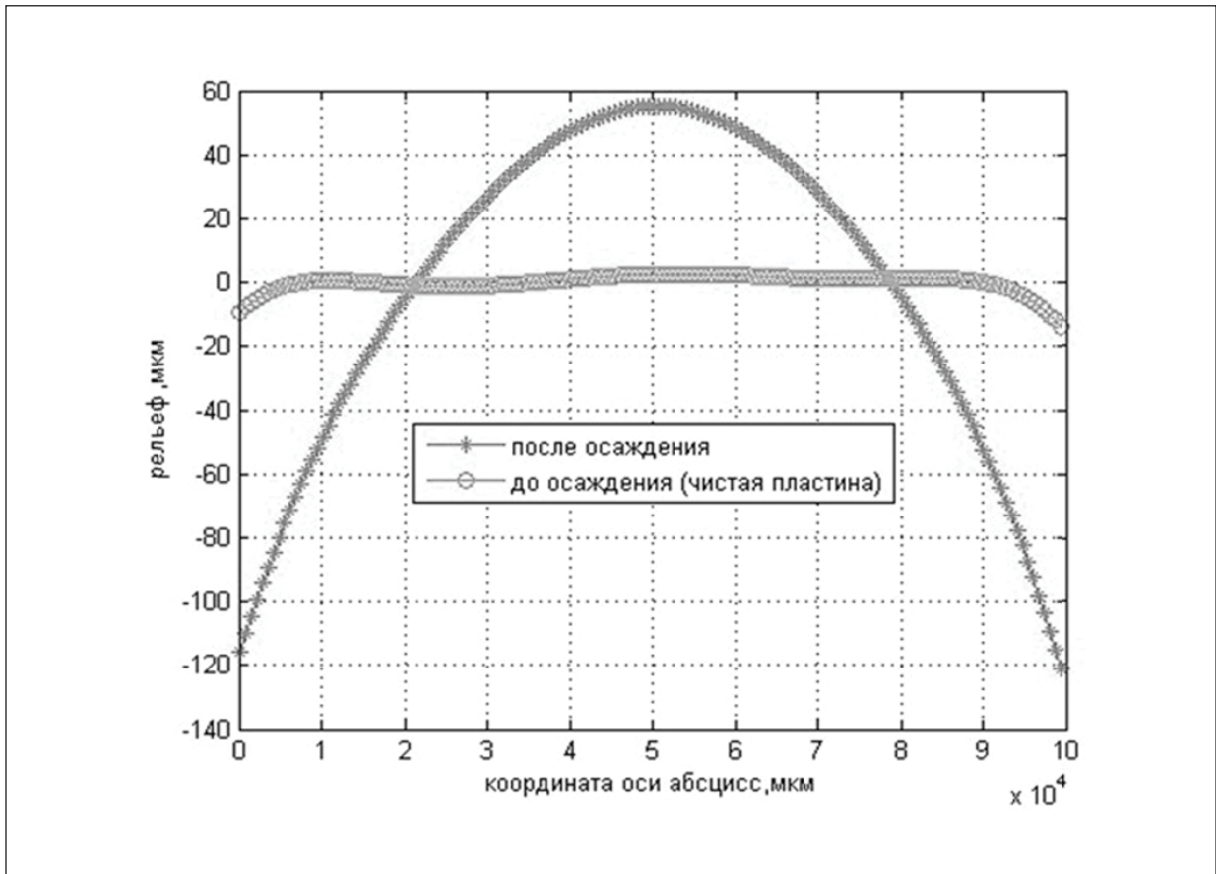


Рис. 15. Профиль поверхности в параллельном базовому срезу направлении

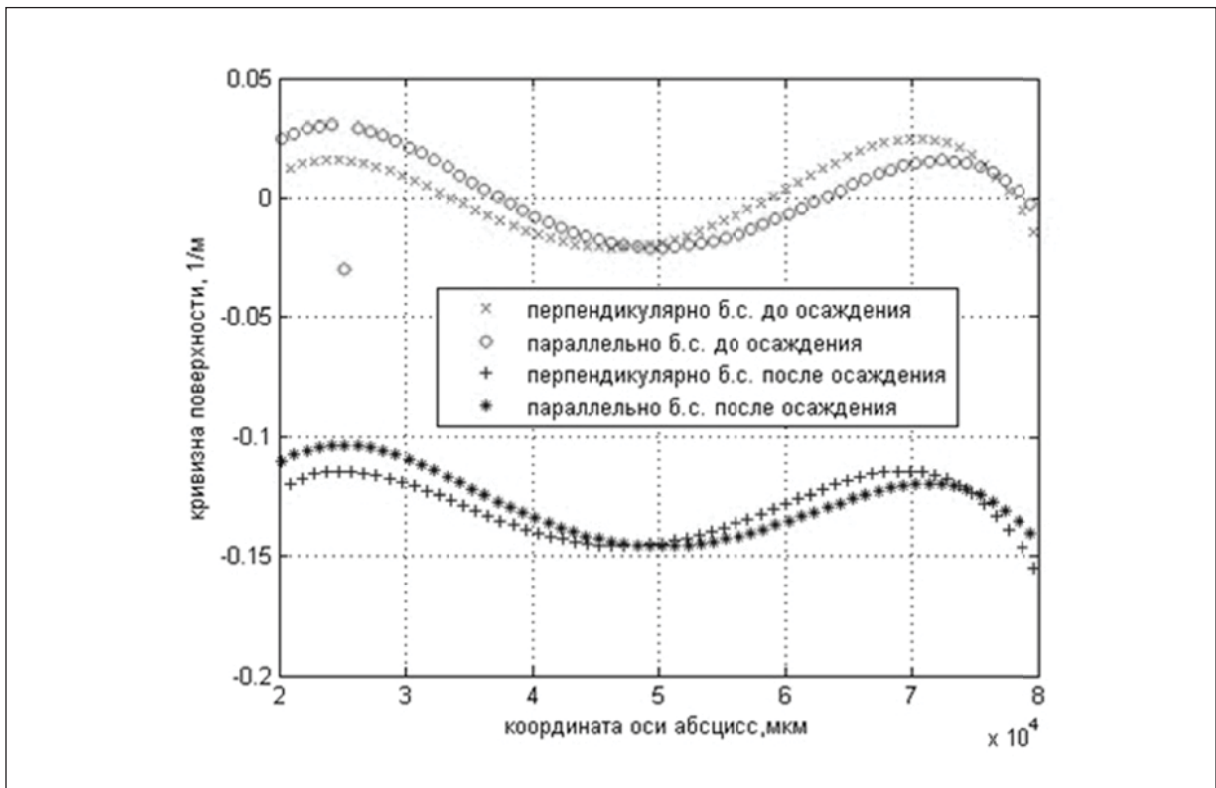


Рис. 16. Результат вычисления кривизны поверхности до и после осаждения слоя

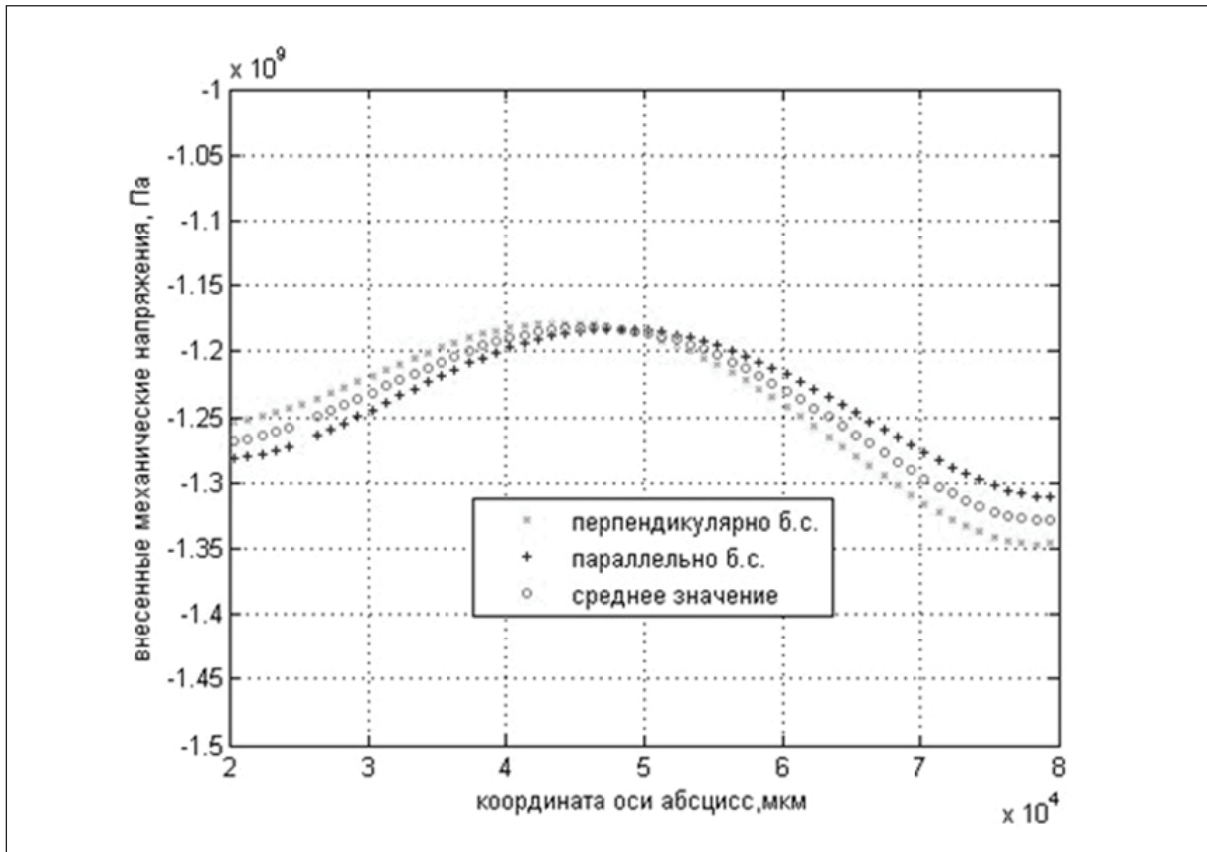


Рис. 17. Распределение механических напряжений по пластине

незначительные положительные механические напряжения, то величина напряжений увеличилась. Т.к. для состояния равновесия системы подложка-плёнка результирующая силы сжатия-растяжения должна быть равна нулю, то в плёнке  $\text{Si}_3\text{N}_4$  отрицательные сжимающие напряжения равны по величине напряжениям в кремнии.

С помощью описанного выше алгоритма в Matlab выполнен расчёт величины кривизны поверхности до и после плазмохимического осаждения плёнки; результат представлен на рисунке 16.

Как следует из рисунка 3, после осаждения плёнки нитрида кремния величина кривизны поверхности возросла по модулю.

Далее по формуле (1) с помощью алгоритма в Matlab определены величины механических напряжений (рис.4), внесенных операцией плазмохимического осаждения 672 нм плёнки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , где постоянная двухосного модуля ( $E/(1-\nu_s)$ ) в кристаллографической плоскости образца (100) составляет 180,5 ГПа [14].

Из представленного графика видно, что максимальное напряжение на пластине составляет -1,35 ГПа. Результаты позволяют локализовать области с максимальной величиной напряжения. Сравнения значения полученного максимального напряжения и критического напряжения для данного материала, можно предотвратить растрескивание структуры, сделав, например, термообработку [21] структуры с целью минимизации напряжений. Также рассчитано среднее значение напряжения по пластине в целом, которое составляет -1,25 ГПа, что по порядку величины соответствует [19,22,23].

### Эксперимент

Проведена оптимизация технологического маршрута формирования мембраны для тепловых датчиков с целью минимизации механических напряжений внутри мембраны. В процессе проведения эксперимента использовалась методика определения механических напряжений по изгибу пластины, т.к. приоритетным параметром являлась планарность поверхности, а не идентификация состава образца.

На утоненной пластине монокристаллического кремния толщиной 460 мкм с кристаллографической ориентацией (100) был выращен термический оксид кремния толщиной 0.6 мкм. Далее методом PECVD осажден слой нитрида кремния толщиной 0.13 мкм. После этого проведено плазмохимическое осаждение  $\text{SiO}_2$  толщиной 0.4 мкм. Далее сделана термообработка образца в сухом кислороде при температуре  $950^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Финальной технологической операцией, перед осаждением чувствительного элемента из Pt, было осаждение 0.13 мкм высокотемпературного  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Технологический маршрут представлен на рисунке 18.

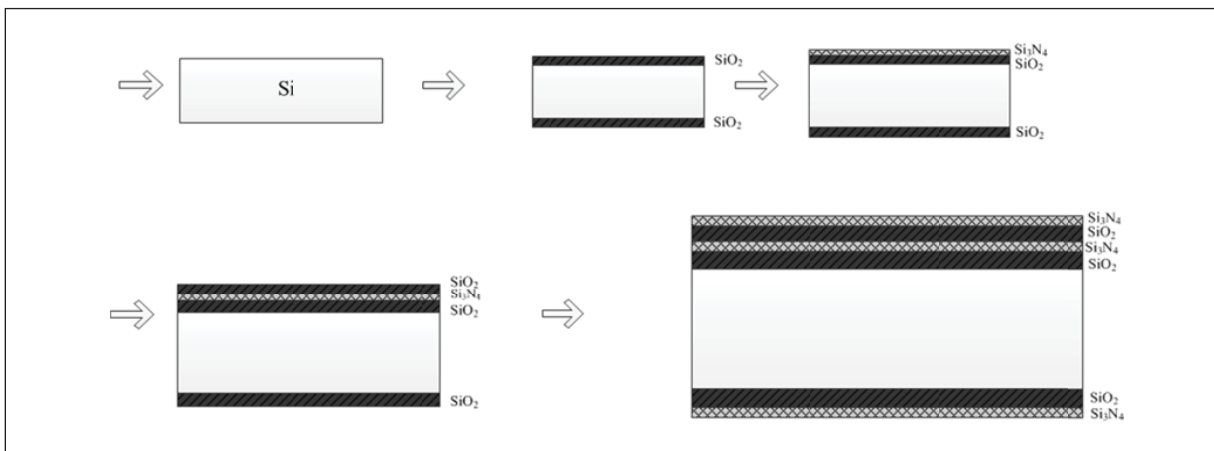


Рис. 18. Технологический маршрут

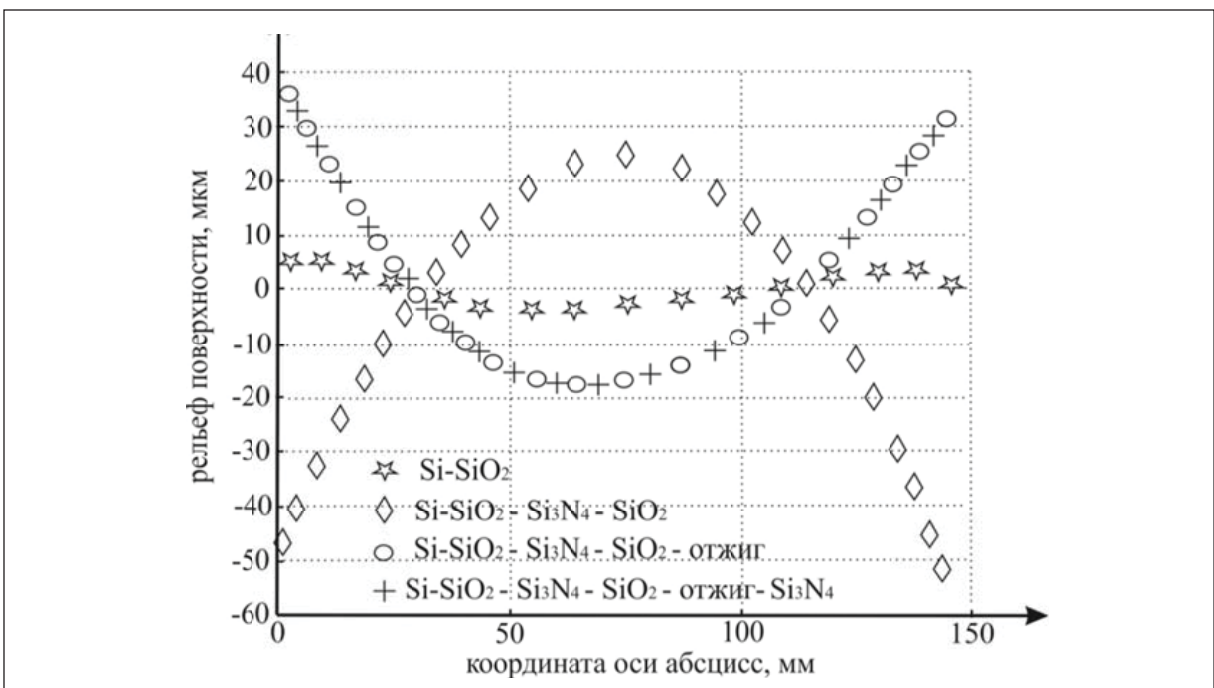


Рис. 19. Измерение рельефа поверхности исследуемого образца

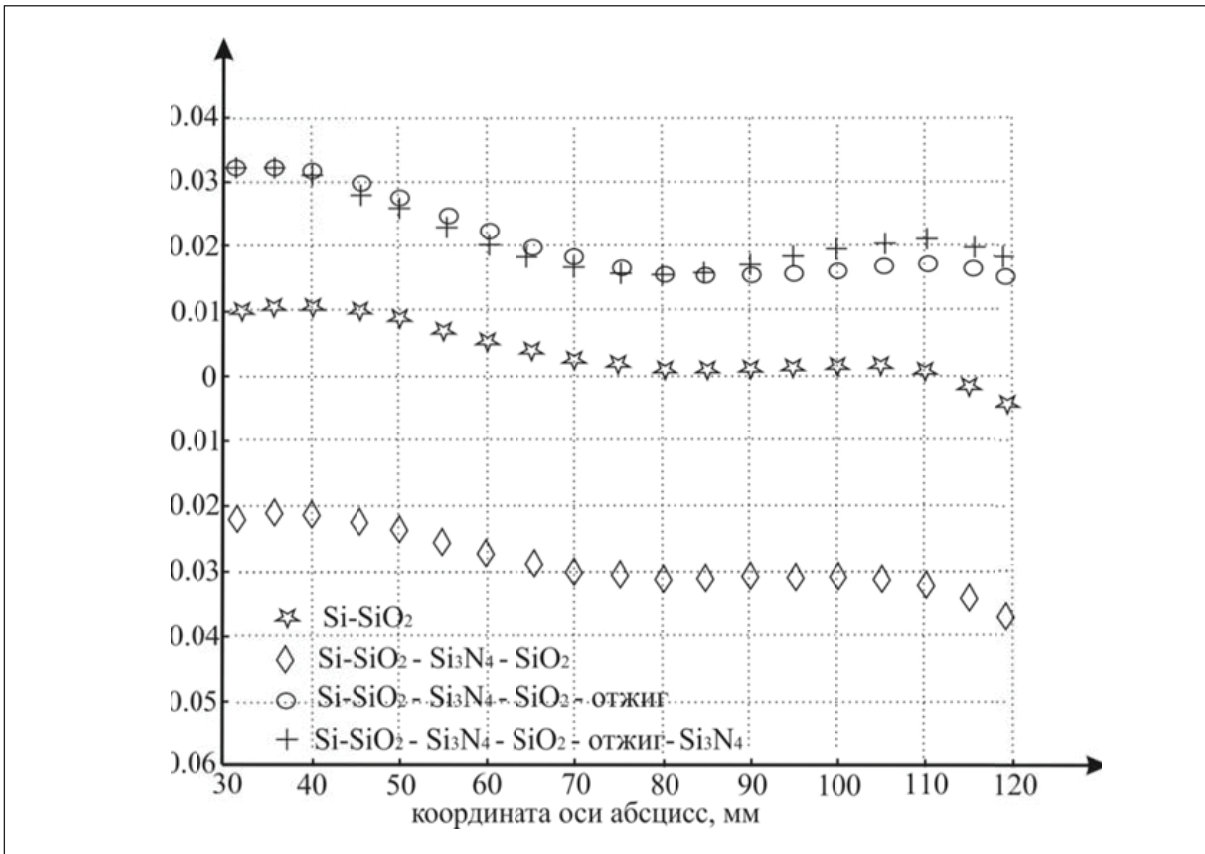


Рис. 20. Расчёт кривизны поверхности исследуемого образца

Проведено измерение рельефа поверхности исследуемого образца с помощью бесконтактного оптического профилометра. Шаг измерения между соседними точками поверхности составляет  $0.28 \text{ мкм}$ . Площадь кристалла составляет не менее  $1 \text{ мм}^2$ . Таким образом, обеспечивается наглядное представление данных по поверхности каждого кристалла пластины. Результаты измерений и расчётов в направлении перпендикулярно базовому срезу представлены на рисунках 19 и 20.

Из рисунка 19 можно заключить, что проведение отжига изменило знак величины стрелы прогиба. После операции осаждения высокотемпературного нитрида кремния рельеф поверхности остался неизменным.

Из рисунка 20 видно, что в четырехслойной мембране величина кривизны поверхности не изменилась после осаждения верхнего нитрида кремния. Далее сделан расчёт механических напряжений в исследуемом образце по методу Стони(1).

На рисунке 21 представлен расчёт механических напряжений.

Из рисунка 21 можно заключить, что в четырехслойной мембране присутствуют незначительные положительные механические напряжения. Следовательно, уменьшается вероятность гофрирования поверхности. Значит, после плазмохимического травления пластины с обратной стороны, структура будет «слегка натянутой», что позволит повысить прецизионность измерений.

## Выводы

На основании проведенной работы установлено, что из рассмотренных возможных конфигураций сенсора наилучшим с точки зрения чувствительности является вариант с



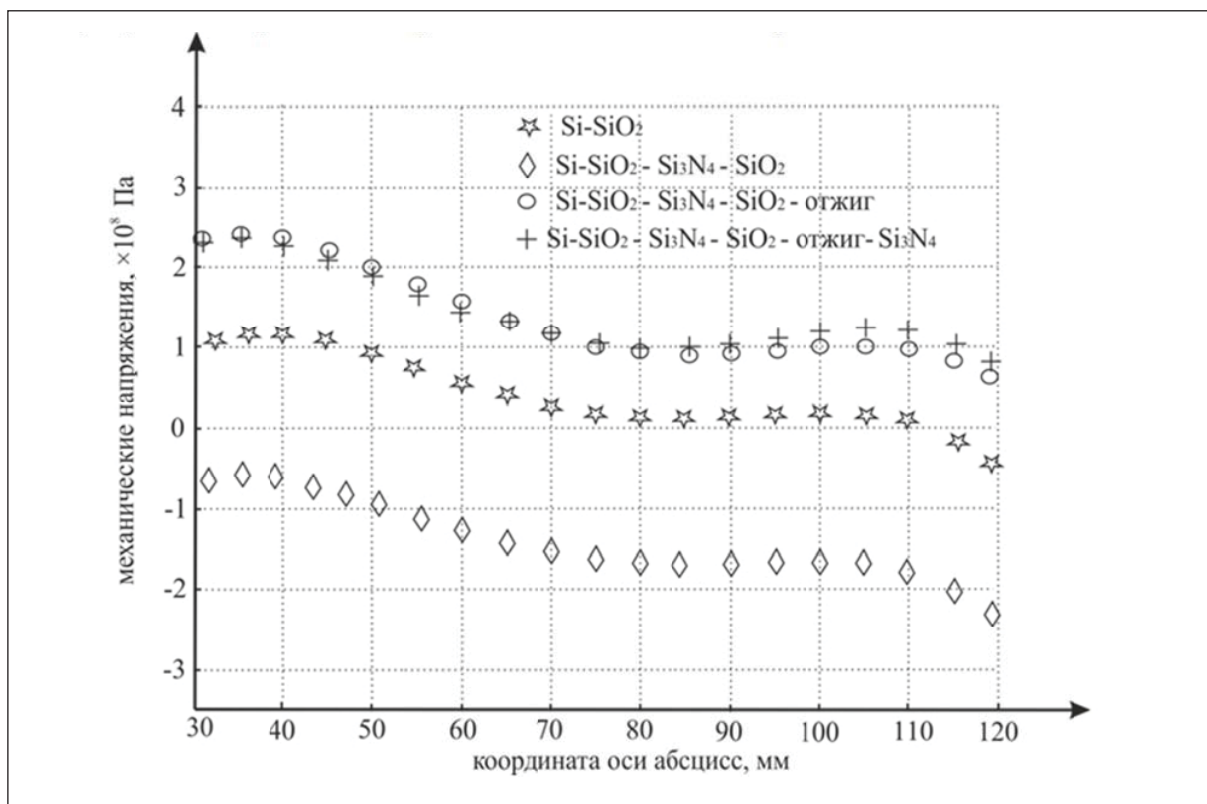


Рис. 21. Расчёт механических напряжений исследуемого образца

нанесенными на обратную сторону мембраны терморезисторами и расположением на крыле. Показана схожесть экспериментальных и полученных в ходе численного моделирования выходных характеристик сенсора. Продемонстрировано, что улучшение аэродинамики чувствительного элемента ведет к увеличению чувствительности устройства. Наглядно показано, что поворот конструкции на угол, больший, чем на  $10^\circ$  к потоку газа, обеспечивает повышение чувствительности в 2 раза. Установлено, что молекулярный состав среды влияет на чувствительность сенсора.

Проанализированы и апробированы две методики определения механических напряжений: с помощью профилометра по изгибу пластины и методом комбинационного рассеяния света по сдвигу частоты Рамана. Выполнена оптимизация технологического маршрута формирования мембраны для тепловых датчиков с целью минимизации механических напряжений внутри мембраны для предотвращения растрескивания, гофрирования или отслаивания слоёв.

**Поддержка.** Работа была выполнена при поддержке Минобрнауки России, ГК № 3.2501.2014/К, с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ.

### Литература

1. Вернер В.Д., Мальцев П.П., Сауров А.Н., Чаплыгин Ю.А. Синергетика миниатюризации: микроэлектроника, микросистемная техника, наноэлектроника // Микросистемная техника. - 2004. - N 7. - С. 23-29
2. Беспалов В.А., Васильев И.А., Дюжев Н.А., Мазуркин Н.С., Новиков Д.В., Попков А.Ф.. Моделирование первичного преобразователя скорости потока газа мембранного типа // Известия Вузов. Электроника. №3, 2014, с. 50-56.

3. Колесов В.П. Основы термохимии // М.: Изд-во МГУ. 1996. 205 с.
4. Барышников С.В., Чарная Е.В., Милинский А.Ю., Шацкая Ю.А.. Диэлектрические и калориметрические исследования  $\text{KNO}_3$  в порах наноразмерных силикатных матриц МСМ-41 // Физика твердого тела, том 54, вып. 3, с. 594-599, 2012
5. Паников Т.Л., Бритвин С.Н.. Об использовании дифференциальной сканирующей калориметрии для исследования структурных особенностей органических и неорганических соединений // Ресурсный центр «Рентгенодифракционные методы исследования», Санкт-Петербургский государственный университет, с. 1-4, 2013
6. Бугаева А.Ю., Белый В.А. Метод дифференциальной сканирующей калориметрии для исследования наноматериалов // Учреждение Российской академии наук Институт химии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, с. 210-213, 2011.
7. Замышляева О.Г. (Со)полимеры различной архитектуры на основе перфторированных гидридов германия: синтез, структура, свойства // Дис. д-ра хим. наук 02.00.06, 2013.
8. Еськов А.В. Твердотельные охлаждающие свойства на основе электрокалорического эффекта в сегнетоэлектрических материалах // Дисс. кан-та тех. наук 05.27.01, 2014.
9. Смирнова Н.Н., Захарова Ю.А., Замышляева О.Г.. Калориметрическое изучение шитого (со)полимера на основе перфторированных гидридов германия // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, №1, стр. 91-99, 2011.
10. Измеритель потока / Дюжев Н.А. // Патент РФ №2014140442/28
11. N. A. Djuzhev, D. Novikov, V. Ryabov, Application of the Streamlined Body for Properties Amplification of Thermoresistive MEMS Gas Flow Sensor // Solid State Phenomena, Vol. 245, p. 247-252, 2016
12. Sinha A. K., Levinstein H. J., Smith T. E. Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films ( $\text{SiN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , and  $\text{SiO}_2$ ) on Si substrates // Journal of Applied Physics. Vol. 49, p. 2423 – 2426, 1978

## MATHEMATICAL MODELING AND STUDY OF OPERATION CONDITIONS OF MEMBRANE TYPE FLOW SENSOR

N.A.Djuzhev<sup>1</sup>, E.E. Gusev<sup>1</sup>, M.A. Makhaboroda<sup>1</sup>, M.V. Kateev<sup>1</sup>,  
K.V. Ponkratov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research University of Electronic Technology, Moscow  
<sup>2</sup>LLC “Renishaw”

bubbledouble@mail.ru

Received 19.08.2016

In this work it was the primary device is simulated gas flow rate through membrane type calorimetric principle of operation. We present two methods for determining mechanical stress: using profiler for bending plates and method of Raman scattering of light by the Raman shift frequency. The optimization of the process flow of forming a membrane for thermal sensors in order to minimize mechanical stresses within membrane. A comparative analysis of numerical simulation based thermistor temperature difference in horizontal arrangement of the sensor element with experiment. Considered include sensor structure. We get results of numerical modeling of different variants of the sensor. A search for optimal position of the sensor in pipe to flow gas to be measured in order to achieve maximum sensitivity. The influence of the working environment on the sensor performance. The results allow us to find the optimal configuration for the moment and location of thermal sensor.