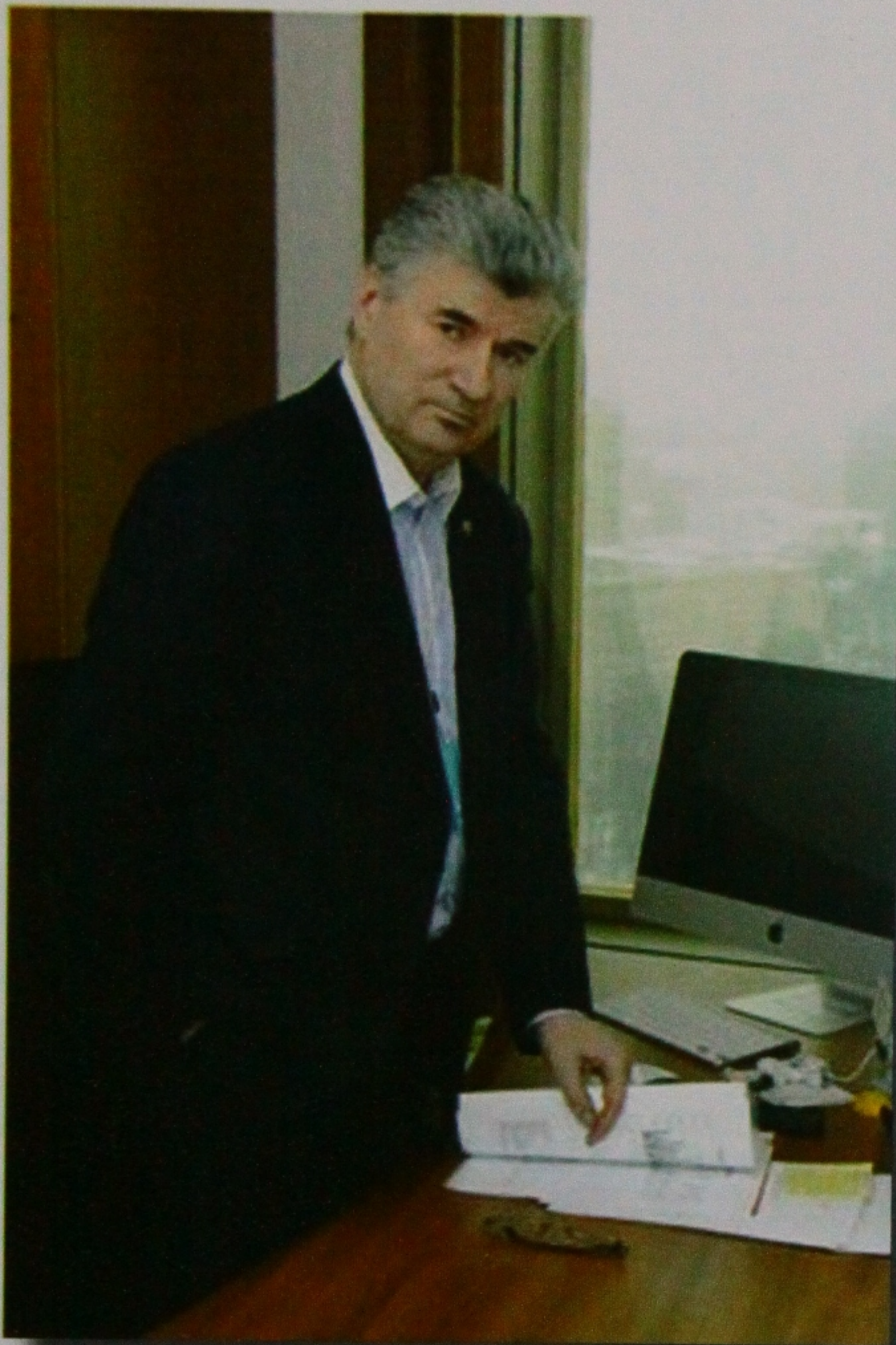




МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Э. БАУМАНА

Кафедре «Проектирование и технология производства
электронной аппаратуры» — 75 лет



*Заведующий кафедрой ИУ4
МГТУ им. Н.Э. Баумана, заслуженный деятель
науки РФ, руководитель ведущей научной школы
РФ, член-корреспондент РАН, д-р техн. наук,
профессор В.А. Шахнов*

Лауреатом Гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ. Проводимые исследования охватывают вопросы конструкторско-технологического проектирования и системного анализа сложных распределенных встраиваемых информационно-управляющих и наукоемких систем, проблемы нанотехнологии, внедрения новых методов передачи знаний. На базе ведущей научной школы действует НОЦ «Нанотехнологические системы и наноэлектроника», СКБ «Сенсорные системы» и российско-французский центр компетенции STMicroelectronics по встраиваемым электронным системам.

Надеюсь, что публикуемые в этом номере журнала статьи авторов МГТУ им. Н.Э. Баумана, отражающие результаты исследований, проводимых в рамках нашей научной школы, будут интересны и полезны специалистам в области сенсорных информационно-управляющих систем.

МГТУ им. Н.Э. Баумана — одно из старейших учебных заведений России. Являясь мощным центром разработки и исследований по передовым направлениям науки, техники и технологий, он по праву признан национальным исследовательским университетом техники и технологий.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана активно развивается инфраструктура научно-образовательных центров, вводятся в строй комплексы уникального оборудования и предметные исследовательские лаборатории. В Университете активно функционирует СНТО, проектный бизнес — инкубатор, сеть центров коллективного пользования. «Каждой лаборатории Университета — малое инновационное предприятие» — вот эффективная формула организации инновационного исследовательского университетского кластера.

Одной из ведущих научных школ Российской Федерации является научная школа «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике», сложившаяся в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» (ИУ4). Уже четыре раза она становилась

Предлагаемая читателям подборка статей приурочена к 75-летию кафедры "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры" МГТУ им. Н. Э. Баумана. В подборку вошли статьи, посвященные проблемам конструкторско-технологической информатики в радиоэлектронике и практическому применению распределенных информационно-управляющих встраиваемых систем.

В статьях представлены результаты прикладных исследований сенсорных систем, предложены их математические модели. Рассмотрены методики визуального проектирования сложных технических систем. Представлена архитектура стенда испытаний датчиков давления.

Полученные результаты являются фундаментальной основой для реализации сенсорных сетей нового поколения.

УДК 621.821.8.681.586'326:001.57

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГИБРИДНЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ¹

К. А. Андреев, Ю. Н. Тиняков, В. А. Шахнов

Исследуются прикладные вопросы реализации новых поколений чувствительных элементов датчиков давления, вопросы их защиты от электромагнитных помех, самодиагностики, взрывобезопасного исполнения и т. д. Основное внимание уделяется моделям чувствительных элементов преобразователей на основе интеграции объемного кремния, кремниевых и микроэлектронных элементов и наноструктурированных материалов. Полученные результаты будут использованы для реализации интеллектуальных и энергоэффективных сенсорных сетей нового поколения.

Ключевые слова: гибридные чувствительные элементы, датчики давления, сенсорные системы.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены результаты прикладных исследований гибридных чувствительных элементов датчиков давления (объемного кремния, кремниевой мембраны, контактных площадок и металлизации, углеродных нанотрубок с размерами 1,5...50 нм и резисторов на основе легированных областей кремния) и свойств углеродных микро- и наноструктур как компонентов гибридных чувствительных элементов. Исследованы такие свойства нанотрубок как свободный транспорт электронов; степень делокализации электронов в зависимости от длины нанотрубки; степень проводимости и возможности раскачки кремневых чувствительных элементов; вид (однослойная,

многослойная); количество (единственная или в ансамбле); способность к проявлению тензометрического или других физических эффектов, в том числе квантовых, которые будут использованы для разработки методов интеграции кремниевых и углеродных наноструктур и изготовления гибридных наноразмерных чувствительных элементов МЭМС/НЭМС — датчиков давления.

В настоящее время в РФ и за рубежом выпускается множество различных микромеханических приборов измерения давления, использующих кремний как основу для создания чувствительного элемента. Кремний как конструкционный материал для датчиков известен давно. В СССР первая публикация о разработке тензопреобразователей представлена в работе В. И. Ваганова "Интегральные тензопреобразователи", в которой рассмотрены теоретические основы построения тензорезистивных датчиков различного давления и приведены возможные конструктивные реализации.

¹ Работа выполнена в рамках НИОКР по государственному заданию 7.6161.2011 "Гибридные чувствительные элементы интеллектуальных сенсоров распределенных управляющих систем".

Системное описание конструкций и технологий микросистемных датчиков рассмотрено в работах В. Я. Распопова, Б. Г. Коноплева, В. И. Ваганова и др. [1, 2]. В монографиях приведено полное описание конструкций и принципов работы микромеханических приборов, технологических процессов их изготовления. Также монография В. Я. Распопова содержит подробную методику вывода уравнений движения чувствительных элементов, передаточные функции и особенности динамики чувствительных элементов микромеханических приборов.

Развитие наноинженерии и технологий синтеза наноструктурированных материалов позволило создавать новые устройства микросистемной техники, обладающие минимальными габаритами и улучшенными характеристиками. В работах В. Б. Фенолова и Э. Г. Ракова [3] представлены материалы по структуре нанотрубок и методикам синтеза наноматериалов. Основные характеристики углеродных нанотрубок исследованы Фаедоном Аворисом. Методы получения углеродных нанотрубок рассматриваются в работах В. П. Вейко, М. В. Акуленка, Б. Г. Будагына и др. [4–6].

Методы производства углеродных нанотрубок каталитическим пиролизом из газовой фазы этанола предложены в работах Э. Г. Ракова, В. М. Глазова и др. Они базируются на положениях классической теоретической физики. Один из способов получения углеродных нанотрубок и нановолокон на катализаторах произвольной формы предложен М. М. Симуниным, К. В. Горшковым и И. И. Бобринецким [7–11]. Методы формирования устройств на основе углеродных наноматериалов изучались иностранными авторами и представлены в работах [12, 13].

Бурное развитие вычислительной техники открыло новые возможности в исследовании различных физических процессов и создании приборов с заданными техническими характеристиками. Современные технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента позволяют эффективно решать многие научные и технические задачи.

Целью данной работы является систематизация методов и средств интеграции кремниевых материалов и наноматериалов для синтеза наноразмерных, сверхчувствительных элементов преобразователей физических величин для распределенных интеллектуальных информационно-управляющих систем.

Научная новизна исследований заключается в создании комплекса физико-технологических процедур формирования планарных структур мик-

ро- наносистем на основе квазиодномерных проводников различного состава (металлические, углеродные) и геометрии (наносужения, наноконтакты, нанотрубки), демонстрирующих общие механизмы в поведении электрических характеристик. Реализация чувствительных интегрированных элементов датчика давления с использованием нанотрубок имеют высокий уровень новизны.

Предметом исследования являются процессы получения углеродных нанотрубок для интеграции с эффективными способами преобразования давления.

Полученные в результате исследования результаты могут быть использованы в следующих областях [16–18]:

—при разработке процессов получения углеродных нанотрубок;

—в проектировании модулей обработки сигналов чувствительного элемента сенсора;

—для получения омических контактов, импедансов, при исследовании тензометрических и иных физических эффектов;

—при разработке и создании экспериментального образца модуля обработки сигнала сенсора и создании беспроводной АСУ;

—при многомасштабном проектировании и изготовлении гибридных чувствительных элементов преобразователей датчиков давления;

—в создании программного обеспечения для ПЭВМ для мониторинга, настройки и управления интеллектуальной сетью разработанных сенсоров.

В рамках исследований проанализированы принципы преобразования физических величин (давления) в электрический сигнал на основе применения углеродных нанотрубок: с полупроводниковыми, металлическими свойствами, однослойными, многослойными, единственными и в ансамбле. Составлена классификация принципов преобразования физических величин в электрический сигнал. Проведен анализ упругих свойств нанотрубок, а также выявлена зависимость напряжения нанотрубок от давления, получены аналитические зависимости давления от напряжения. Предложены математические модели для гибридных чувствительных элементов датчиков давления, представлена архитектура стенда испытаний датчиков давления и разработано программное обеспечение стенда испытаний датчиков давления, составлена методика испытаний.

Полученные результаты являются фундаментальной базой для реализации интеллектуальных и энергоэффективных сенсорных сетей нового поколения. Одними из самых важных преимуществ

разрабатываемых преобразователей являются повышение чувствительности и снижение температурной зависимости преобразователей, а также уменьшение их габаритов. Научные и практические результаты определяют направления дальнейших исследований проблем интеграции кремниевых структур и наноматериалов для целей создания распределенных устройств информационно-управляющей системы.

МОДЕЛЬ МЕМБРАНЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ТЕНЗОДАТЧИКА

При создании конструкций чувствительных элементов датчиков требуется определиться с размерами интегрального преобразователя (чаще всего мембраны) в датчиках давления. При измерении малых давлений необходимо увеличивать площадь мембраны, но возможности технологического оборудования ограничиваются размерами 6—7 мм. Уменьшение размеров приводит, с одной стороны, к возможности изготовления большего количества чувствительных элементов на одной кремниевой пластине, а с другой — к уменьшению чувствительности датчика. Однако, уменьшение размеров позволяет значительно увеличить собственную частоту конструкции и, тем самым, расширить рабочий диапазон частот.

Моделирование с целью определения геометрических размеров мембран для разных диапазонов измеряемых давлений проведем методом конечных элементов в программной среде ANSYS. Твердотельные трехмерные модели построены в программной среде SolidWorks. Измерения проводятся для мембран из монокристаллического кремния с плоским профилем (рис. 1) и с жестким центром (рис. 6), сформированных в кристаллографической плоскости (100).

Общий размер кристалла 4×4 мм с размером активной части 2×2 мм и толщиной неподвижной рамки 460 мкм.

Моделирование проводилось с материалами, имеющими следующие характеристики: плотность



Рис. 1. Твердотельная трехмерная модель кремниевого кристалла с вырезанной четвертью

2330 кг/м^3 , анизотропная упругость D (в матричном виде), Па:

$$D =$$

$1,66 \times 10^{11}$					
$6,4 \times 10^{10}$	$1,66 \times 10^{11}$				
$6,4 \times 10^{10}$	$6,4 \times 10^{10}$	$1,66 \times 10^{11}$			
0	0	0	$8,0 \times 10^{10}$		
0	0	0	0	$8,0 \times 10^{10}$	
0	0	0	0	0	$8,0 \times 10^{10}$

На рис. 2 (см. цветную вклейку) показана сетчатая модель кристалла, изометрия мембраны в объемном кремнии.

Исследования проводятся для равномерно нагруженной пластины с жестко зафиксированной рамкой кристалла.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОЙ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ

На рис. 3 (на цветной вклейке) показана кремниевая пластина под нагрузкой в 10 МПа. В результате расчета определены минимумы и максимумы деформации кремниевой мембраны. Все размеры и перемещения указаны в метрах, все напряжения — в паскалях. На рисунке показаны результаты расчета деформации для мембраны толщиной 100 мкм. Максимальный прогиб в центре пластины составил 20,194 мкм.

На рис. 4 (на цветной вклейке) отчетливо просматривается зависимость максимальной деформации по периметру кремниевой мембраны, изготовленной в n -кремнии с плоскостью (100). Наибольшая деформация наблюдается на серединах сторон квадратной мембраны в местах заделки активной части мембраны в неподвижной рамке кристалла.

Именно в местах наибольшей деформации и требуется располагать тензорезисторы. Важным моментом при проектировании упругого элемента из кремния является выбор рабочих механических напряжений в зоне расположения тензорезисторов. Различные источники дают значение предела прочности кремния с большой зоной неопределенности от 20 МПа до 3...5 ГПа. Это связано с качеством обработки поверхности и с тем, насколько тщательно удален дефектный приповерхностный слой. Наиболее усредненное значение предела прочности кремния равно 450 МПа, его и будем использовать для определения запаса прочности для мембран различной конфигурации. Определение запаса прочности мембраны представлено на рис. 5 (см. цветную вклейку).

Пределы измерения выбраны по ГОСТ 22520—85 для датчиков избыточного давления. Максимальное давление для толщины мембраны выбиралось

по критерию прочности на растягивающее напряжение с коэффициентом запаса прочности >1 . В табл. 1 приведены значения суммарной деформации мембраны для диапазона давления и выбранной толщины мембраны.

Ограничения минимальной толщины мембраны в 20 мкм обусловлено технологическими возможностями изготовления чувствительных элементов и сборки датчиков. Из таблицы видно, что на малые давления при толщине мембраны 20 мкм прогиба мембраны недостаточно для достижения требуемой чувствительности и необходимой величины выходного сигнала датчика, поэтому на данные диапазоны давлений требуется не умень-

шать толщину мембраны, а увеличивать ее площадь. В табл. 2 приведены значения деформаций для мембраны размером 4×4 мм.

На давления свыше 250 МПа требуемая минимальная толщина мембраны превышает толщину кристалла, следовательно, для данных давлений необходимо уменьшать площадь активной части кристалла. В табл. 3 приведены величины деформации мембраны размером 1×1 мм.

Из таблиц 1—3 видно, что уменьшение толщины мембраны увеличивает максимальные перемещения мембраны и уменьшает жесткость конструкции, тем самым снижая рабочий диапазон частот датчика.

Таблица 1
Значения деформации для мембран размером 2×2 мм различной толщины

Давление, Па	Толщина мембраны, мкм	Перемещение, мкм	Коэффициент запаса прочности		
60	20	0,011908	15		
63		0,012504			
100		0,019847			
160		0,031755			
250		0,049618			
400		0,079388			
600		0,11908			
630		0,12504			
1000		0,19847			
1600		0,31755			
2500		0,49618			
4000		0,79388			
6000		20		1,1908	15
6300				1,2504	
10000	1,9847				
16000	3,1755				
25000	4,9618				
40000	7,9388				
60000	11,908				
63000	12,504				
$1,0 \times 10^{05}$	19,847				
$1,0 \times 10^{06}$	30		60,361	1,2596	
$1,6 \times 10^{06}$	40	41,943	1,3458		
$2,5 \times 10^{06}$	50	34,601	1,3441		
$4,0 \times 10^{06}$	60	33,070	1,1617		
$6,0 \times 10^{06}$	70	32,258	1,0451		
$6,3 \times 10^{06}$	80	23,430	1,2965		
$1,0 \times 10^{07}$	100	20,194	1,2989		
$1,6 \times 10^{07}$	120	20,096	1,1842		
$2,5 \times 10^{07}$	140	21,020	1,0522		
$4,0 \times 10^{07}$	180	17,735	1,1347		
$6,0 \times 10^{07}$	210	17,996	1,0890		
$6,3 \times 10^{07}$	220	17,009	1,3517		
$1,0 \times 10^{08}$	300	12,429	1,5494		
$1,6 \times 10^{08}$	350	13,452	1,3061		
$2,5 \times 10^{08}$	400	14,958	1,0835		
$4,0 \times 10^{08}$	—	—	—		
$6,0 \times 10^{08}$	—	—	—		
$6,3 \times 10^{08}$	—	—	—		
$1,0 \times 10^{09}$	—	—	—		

Таблица 2
Значения деформации для мембран размером 4×4 мм различной толщины

Давление, Па	Толщина мембраны, мкм	Перемещение, мкм	Коэффициент запаса прочности
60	20	0,18898	15
63		0,19843	
100		0,31496	
160		0,50394	
250		0,78741	
400		1,2599	
600		1,8898	
630		1,9843	
1000		3,1496	
1600		5,0394	
2500		7,8741	
4000		12,599	
6000		18,898	
6300		19,843	
10000	31,496		
16000	30	15,100	15
25000		23,593	12,862
40000	40	16,129	13,630
60000		24,193	9,086
63000		25,403	8,654
$1,0 \times 10^{05}$	50	20,927	8,195

Таблица 3
Значения деформации для мембран размером 1×1 мм различной толщины

Давление, Па	Толщина мембраны, мкм	Перемещение, мкм	Коэффициент запаса прочности
$2,5 \times 10^{08}$	250	6,6989	1,5542
$4,0 \times 10^{08}$	280	8,5259	1,2013
$6,0 \times 10^{08}$	320	9,5629	1,0655
$6,3 \times 10^{08}$	320	10,041	1,0148
$1,0 \times 10^{09}$	400	10,033	1,008

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА С ЖЕСТКИМ ЦЕНТРОМ

Учитывая результаты, полученные для плоской мембраны, были проведены численные расчеты деформаций нагруженной кремниевой мембраны с жестким центром.

Сначала проведем расчет уточненных деформаций методом конечных элементов для кремниевой мембраны с жестким центром. Для расчета были выделены точки, определяющие положения реальных топологических элементов — тензорезисторов на кремниевой мембране и интегрированном кремниевом преобразователе давления.

На рис. 6 приведено изображение кремниевой мембраны с жестким центром.

Моделирование проводится для мембраны размером 2×2 мм с жестким центром размером 1×1 мм. На рис. 7 (см. цветную вклейку) приведена сетчатая модель мембраны чувствительного элемента датчика давления.

На рис. 8 (см. цветную вклейку) показан вид распределения суммарных перемещений мембраны толщиной 100 мкм, нагруженной давлением в 6 МПа.

Максимальное перемещение жесткого центра составило 4,6 мкм, что значительно меньше, чем в случае с плоской мембраной. Конструкция мембраны стала более жесткой, увеличились максимальные напряжения в местах заделки мембраны (см. рис. 9 на цветной вклейке).

Максимальное значение относительной упругой деформации по Мизесу составило 0,0028691. В точках с максимальной относительной деформацией мембраны необходимо располагать (имплантировать) резисторы, включаемые в мостовые схемы.

Прочность конструкции рассчитывалась с учетом предела прочности кремния в 450 МПа. Определение минимального коэффициента запаса прочности для различных участков кремниевой мембраны приведено на рис. 10 (см. цветную вклейку).

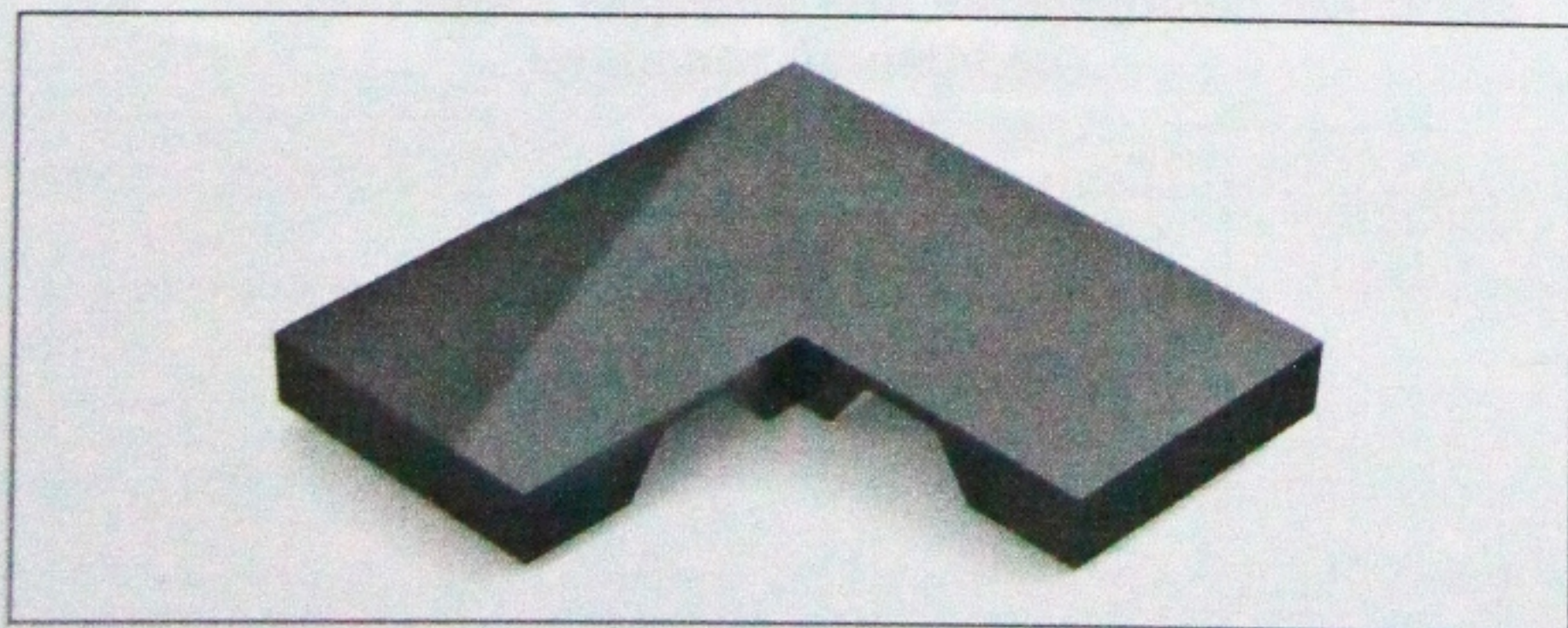


Рис. 6. Трехмерная модель кремниевых кристалла с жестким центром и вырезанной четвертью

Таблица 4

Значения деформации для мембран размером 2×2 мм с жестким центром размером 1×1 мм различной толщины

Давление, Па	Толщина мембраны, мкм	Перемещение, мкм	Коэффициент запаса прочности
4000	20	0,18172	15
16000		0,72688	15
25000		1,1358	13,677
60000		2,7258	5,6989
$1,0 \times 10^5$		4,543	3,4193
$1,6 \times 10^5$		7,2688	2,1371
$2,5 \times 10^5$		11,358	1,3677
$4,0 \times 10^5$	25	9,7678	1,2619
$6,0 \times 10^5$	30	8,9089	1,1627
$1,0 \times 10^6$	40	6,9234	1,1760
$1,6 \times 10^6$	50	6,2657	1,1141
$2,5 \times 10^6$	60	6,2481	1,0086
$4,0 \times 10^6$	80	5,0845	1,1039
$6,0 \times 10^6$	100	4,6084	1,1720

Таблица 5

Значения деформации для мембран размером 3×3 мм с жестким центром размером 1×1 мм различной толщины

Давление, Па	Толщина мембраны, мкм	Перемещение, мкм	Коэффициент запаса прочности
4000	20	1,8161	15,
16000		7,2644	9,5185
25000		11,351	6,0918
60000		27,242	2,5383
$1,0 \times 10^5$		45,403	1,523
$1,6 \times 10^5$	30	35,364	1,2235
$2,5 \times 10^5$	35	22,825	1,5969

Максимальное давление для толщины мембраны выбиралось по критерию прочности на растягивающее напряжение с коэффициентом запаса прочности > 1 . В табл. 4 приведены значения суммарной деформации мембраны для диапазона давления и выбранной толщины мембраны.

Аналогично случаю с плоской мембраной для малых давлений увеличим площадь мембраны и выполним моделирование для кристалла 6×6 мм, мембраной 3×3 мм и жестким центром 1×1 мм. Результаты моделирования приведены в табл. 5.

Применение жесткого центра значительно повышает жесткость кремниевой мембраны. Кроме того, жесткий центр возможно использовать в качестве упора, защищающего от перегрузок при превышении максимального давления для данной толщины мембраны. Рассчитанные значения величин перемещения мембраны позволяют определить необходимый зазор между жестким центром и подложкой кристалла. В общем случае для кри-

таллов размером 4×4 мм с мембраной 2×2 мм, исходя из значений, приведенных в табл. 4, данный зазор составит 10 мкм.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки полученных результатов необходимо иметь представление о конструкции датчика. Основным элементом датчика является интегральный кремниевый преобразователь (ИКП). Конструктивно ИКП представляет собой кремниевую пластину, сформированную в плоскости (100), на которой в классическом случае диффузионными методами имплантируются тензорезисторы, соединенные по схеме моста. На рис. 11 представлен вариант размещения тензорезисторов на плоской мембране в местах наибольшей деформации (согласно рис. 4).

Тензорезисторы объединяются в мостовую схему Уитстона. Два из них располагаются параллельно заделке мембраны в кристаллографическом направлении (010) и испытывают влияние продольного тензоэффекта, два других — перпендикулярно заделке и испытывают поперечный тензоэффект.

С обратной стороны кремниевой пластины методом анизотропного травления вытравливается кремниевая мембрана заданной толщины. Преобразование давления в электрический сигнал

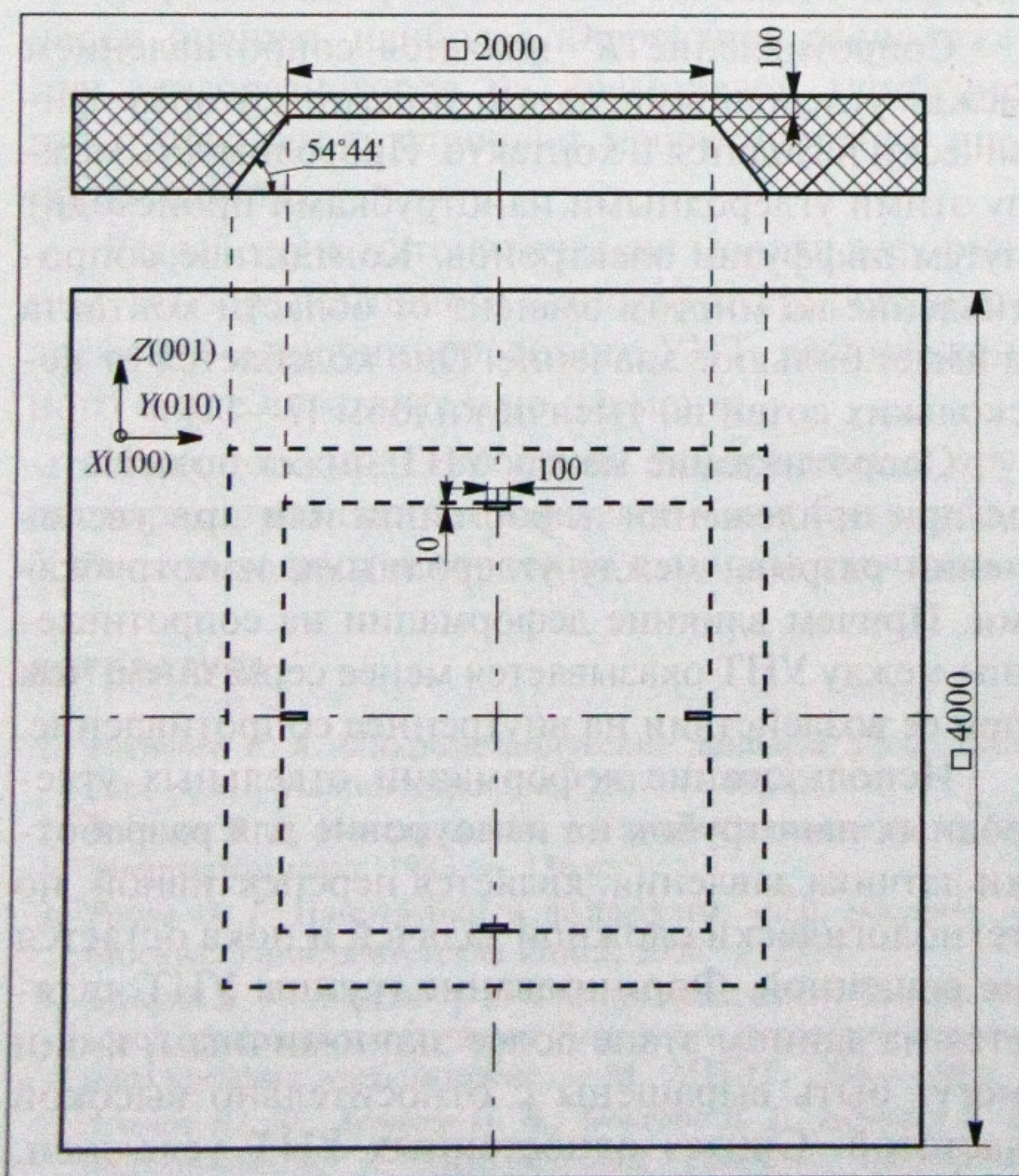


Рис. 11. Расположение тензорезисторов на плоской мембране

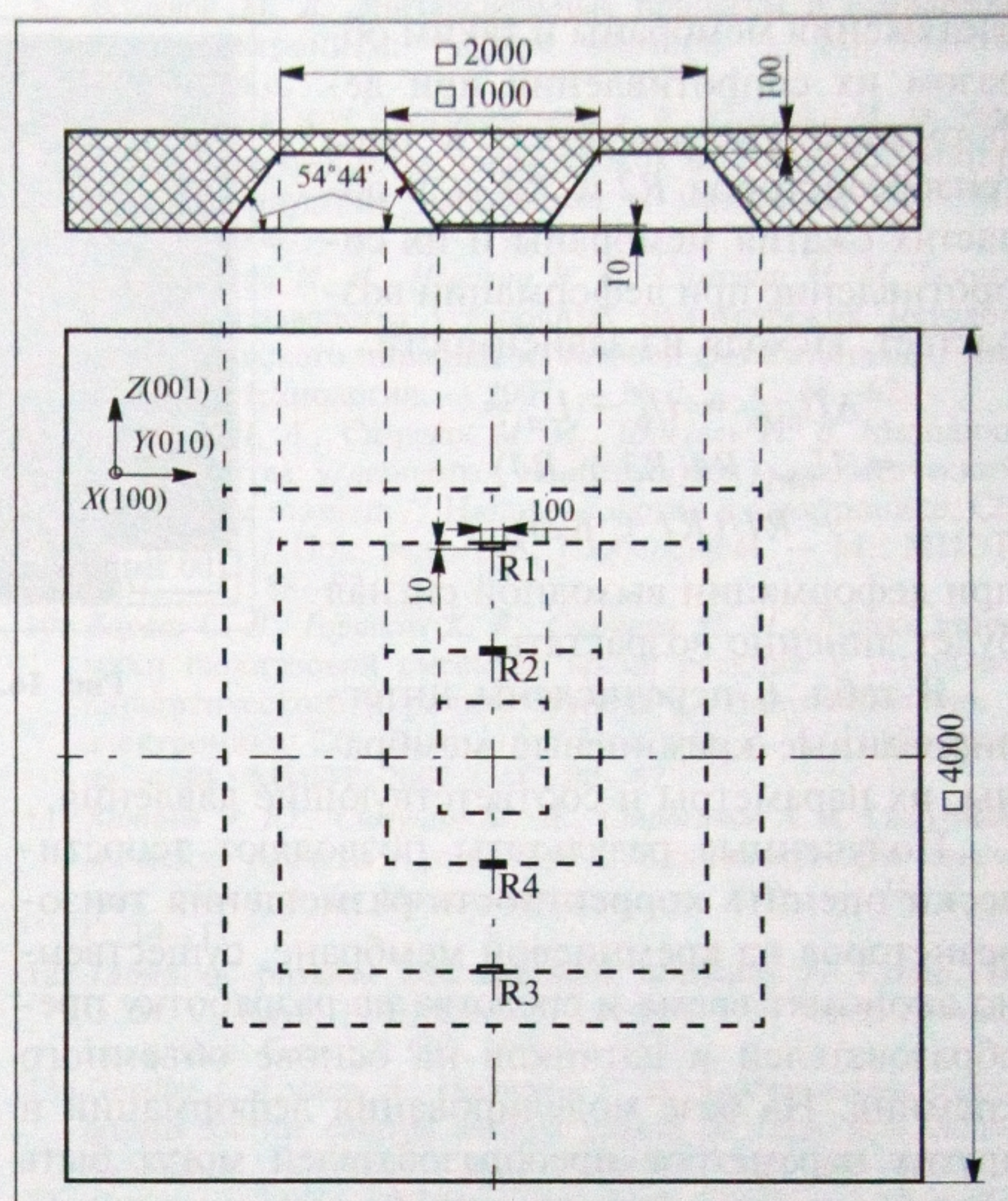


Рис. 12. Расположение тензорезисторов на мембране с жестким центром

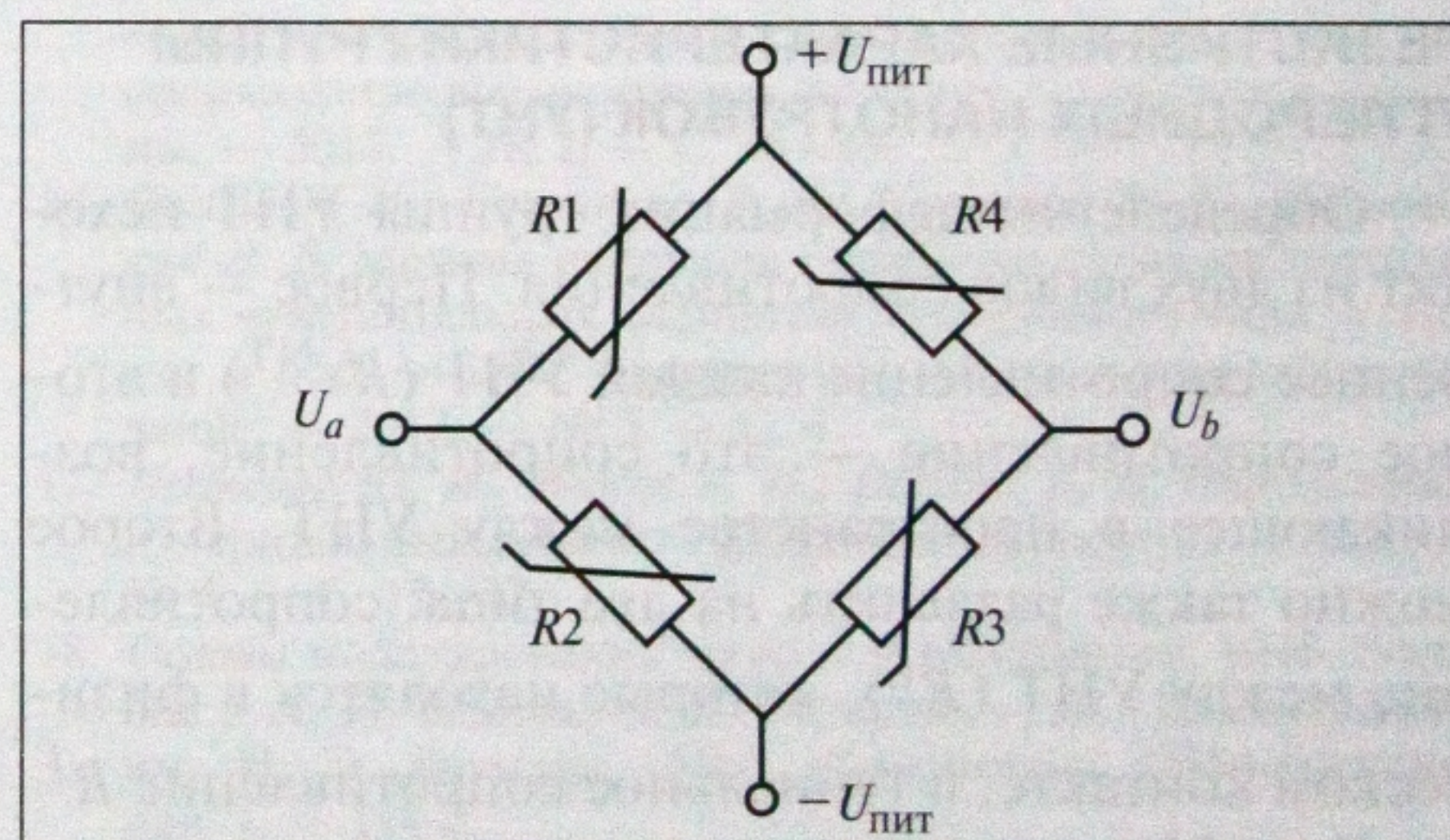


Рис. 13. Мостовая схема Уитстона

происходит за счет прогиба упругой кремниевой мембраны. Значение прогиба (деформации) зависит от толщины мембраны, которая определяется диапазоном измеряемого давления.

На рис. 12 представлен вариант размещения тензорезисторов на мембране с жестким центром в местах наибольшей деформации согласно рис. 9.

Методами интегрирования групп нанотрубок по определенной топологии формируются тензорезистивные элементы, соединенные по схеме моста (рис. 13).

Тензорезисторы располагаются таким образом, что пара $R1$ и $R3$ располагается в областях

растяжения мембраны и таким образом их сопротивления при деформации уменьшаются, а пара тензорезисторов R_2 и R_4 — в областях сжатия мембраны и их сопротивление при деформации возрастает. Исходя из зависимости

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{вых}} &= U_b - U_a = \\ &= U_{\text{пит}}(R_4(R_3 + R_4) - \\ &\quad - R_1/(R_1 + R_2)), \end{aligned}$$

при деформации выходной сигнал будет линейно возрастать.

В табл. 6 перечислены интегрированные кремниевые мембраны, их параметры и соответствующие давления.

Полученные результаты позволяют теоретически оценить корректность размещения тензорезисторов на кремниевой мембране, существенно экономят время и средства на разработку преобразователей и датчиков на основе объемного кремния. На базе моделирования деформаций и других параметров преобразователей могут быть разработаны методики по разработке датчиков давления. Полученные данные могут быть оценены при сравнении с экспериментальными данными.

РЕЗИСТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУППЫ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК (УНТ)

Определение деформации группы УНТ исходит из двух видов сопротивления. Первое — внутреннее сопротивление каждой УНТ (R^{CNT}) и второе сопротивление — это сопротивление, возникающее в пространстве между УНТ. Второе можно также разделить на два типа: сопротивление между УНТ (R^{C}), которые находятся в физическом контакте, и туннельное сопротивление R^{T} .

Рис. 14 иллюстрирует возможные положения УНТ относительно друг друга в процессе формирования УНТ методом CVD на подложке.

Внутреннее сопротивление УНТ. Углеродные нанотрубки могут выступать в качестве хороших

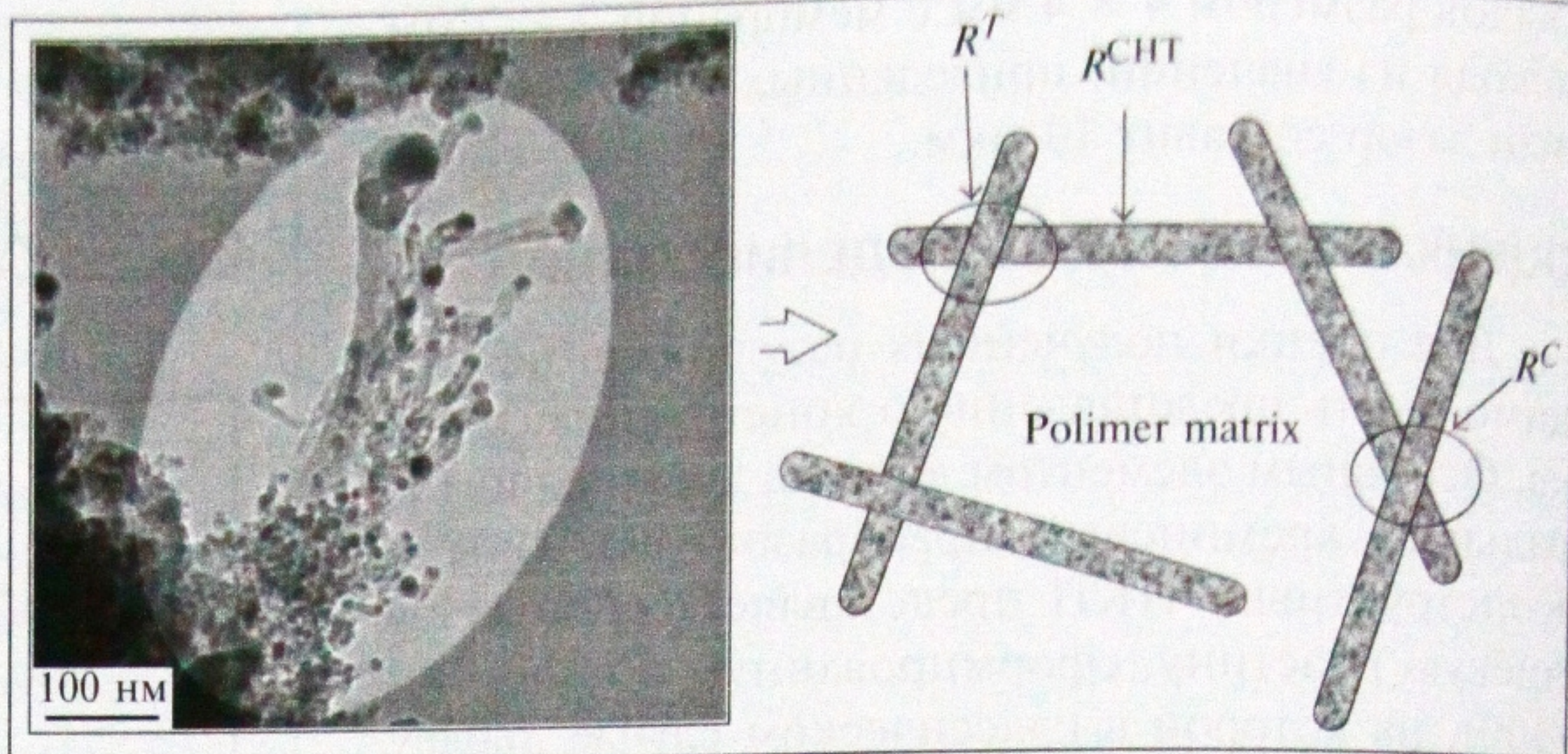


Рис. 14. Иллюстрация группы УНТ в композиционном материале

проводников, так как их молекулярная структура позволяет переносить электроны. Сопротивление группы УНТ составляет порядка $0,2 \dots 0,4$ кОм/мкм. Внутреннее сопротивление углеродных нанотрубок подвергается изменению при деформации. Оно экспоненциально возрастает с приложенной деформацией и в какой-то мере зависит от хирального угла углеродных нанотрубок [3—11]. Несмотря на изначально высокую проводимость самих углеродных нанотрубок, проводимость в группе углеродных нанотрубок меньше, так как сопротивление между УНТ выше в сравнении с внутренним сопротивлением. Как было уже сказано ранее, сопротивление между УНТ состоит из двух типов, как схематически показано на рис. 14.

Сопротивление R^{C} является сопротивлением между углеродными нанотрубками, которые физически находятся в контакте. Проводимость между этими углеродными нанотрубками происходит путем диффузии электронов. Контактное сопротивление во многом зависит от области контакта и имеет большое значение. Оно колеблется от нескольких сотен до тысячи килоом [3—11].

Сопротивление между УНТ может повышаться при приложении деформации или при увеличении разрыва между углеродными нанотрубками. Причем влияние деформации на сопротивление между УНТ оказывается менее серьезным, чем при ее воздействии на внутреннее сопротивление.

Использование деформации отдельных углеродных нанотрубок на наноуровне для разработки датчика давления, является перспективной, но технологически сложной задачей и пока остается не решенной. Формирование группы УНТ является на данном этапе более экономичным, и они могут быть выращены с относительно высокой частотой. Синтез одностенных УНТ усложнен, поскольку ограничен контроль их чистоты, хиральности и электрических свойств.

Таблица 6

Результаты моделирования для некоторых пределов измеряемого давления

Параметры мембраны		$\Delta U_{\text{вых}}$ при перепаде давления 0,1 МПа, мВ	Номинальное давление, МПа
Плоская часть, мкм	Толщина, мкм		
2000 ± 30	50...60	50...80	0,10
2000 ± 30	60...70	31...50	0,16
2000 ± 30	70...80	20...32	0,25
2000 ± 30	80...90	1...2	4,00

Таким образом группы из углеродных нанотрубок перспективны для применения в сенсорах благодаря их тензорезистивным свойствам. Они имеют высокий выходной ток и не чувствительны к пространственной ориентации. Унифицированные УНТ в тонкой пленке отображают свойства почти так же, как отдельные углеродные нанотрубки [3–11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование методом конечных элементов с целью определения геометрических размеров мембран для разных диапазонов измеряемых давлений.

Рассмотрены конструктивно-технологические параметры чувствительных элементов с плоскими мембранами и мембранами с жестким центром. Применение жесткого центра значительно повышает жесткость кремниевой мембраны (в два раза). Кроме того, жесткий центр возможно использовать в качестве упора, защищающего от перегрузок при превышении максимального давления для данной толщины мембраны. Рассчитанные значения деформаций позволяют определить необходимый зазор между жестким центром и упором.

Предложены варианты расположения тензорезисторов на поверхности мембран и рассчитаны значения выходных напряжений для различных толщин мембран и приложенного давления.

Полученные результаты позволяют теоретически оценить наиболее корректное расположение тензорезисторов на кремниевой мембране, что существенно упрощает проектирование преобразователя.

Разработана математическая модель деформации тензорезистивного наноструктурированного элемента модифицированного УНТ, расположенного выше чувствительно элемента.

На основе моделирования деформаций и других параметров преобразователей могут быть разработаны методики построения датчиков давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Распопов В. Я.* Микромеханические приборы: учеб. пособие. — М.: Машиностроение, 2007. — 400 с.
2. *Ваганов В. И.* Интегральные тензопреобразователи. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 136 с.
3. *Раков Э. Г.* Нанотрубки и фуллерены: учеб. пособие. — Москва: Университетская книга, 2006. — 235 с.
4. *Будагян Б. Г., Айвазов А. А.* Физико-химические основы базовой технологии получения аморфного гидрогенизированного кремния: учеб. пособие. — М.: МИЭТ, 1996. — 80 с.
5. *Адамов Ю. Ф., Корнеев Н. В., Мокеров В. Г., Неволин В. К.* Формирование и электрические свойства планарных 2D-наноразмерных структур // Микросистемная техника. — 2000. — № 1. — С. 13–16.

6. *Акуленок М. В.* Эпитаксиальные процессы в технологии микроэлектроники: учебное пособие. — М.: МИЭТ, 1993. — 84 с.
7. *Климовицкий А. Г., Милошевская А. В., Симунин М. М.* Технология производства нанотрубок из этанола // Матер. конф. “Индустрия наносистем и материалов”. — М.: МИЭТ, 2006. — С. 195–196.
8. *Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симунин М. М.* Технология производства углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза из газовой фазы этанола // Химическая технология. — 2007. — № 2. — С. 58–62.
9. *Комаров И. А., Симунин М. М., Шлегель И. В.* Методики производства углеродных нанотрубок каталитическим пиролизом этанола // Нанотехнологии в электронике: Сб. научн. тр. / Под. ред. А. А. Горбачевича. — М.: МИЭТ, 2007. — С. 88–92.
10. *Бараш С. В., Горшков К. В., Симунин М. М.* Оценка динамики парогазовой смеси во время реакции в установке каталитического пиролиза этанола // Нанотехнологии в электронике: Сб. научн. тр. / Под. ред. А. А. Горбачевича. — М.: МИЭТ, 2007. — С. 80–87.
11. *Катаев Э. Ю., Симунин М. М., Строганов А. А.* Газодинамические расчеты в установке CVDомпа методом конечных объемов // Наноиндустрия. — 2009. — № 2. — С. 14–17.
12. *Tables of physical and chemical constants // Comp. By G. W. C. Kaye, T. H. Laby.* — London, New York, Toronto: Longmans, Green & CO, 1956. — 1183 с.
13. *Gavillet J., Loiseau A., Ducastelle F., et al.* Microscopic mechanisms for the catalyst assisted growth of single-wall carbon nanotubes // Carbon. — 2002. — № 40. — P. 1649–1663.
14. *Проектирование наносенсоров: учеб. пособие / А. А. Денисов, В. А. Кальнов, В. А. Шахнов.* — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. (Библиотека “Наноинженерия”). — 128 с.
15. *Андреев К. А., Милешин С. А., Цивинская Т. А.* Анализ методов электростатической сварки кремния и стекла при производстве высокоточных датчиков // Датчики и системы. — 2013. — № 2. — С. 45–49.
16. *Власов А. И., Стешенко В. Б., Нестеров В. А., Мысловский Э. В.* Методы цифровой обработки сигналов тактильных чувствительных элементов мембранного типа // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. — 2012. — № 5. — С. 4.
17. *Нестеров Ю. И., Власов А. И., Першин Б. Н.* Виртуальный измерительный комплекс // Датчики и системы. — 2000. — № 4. — С. 12–22.
18. *Основы моделирования микро- и наносистем: учеб. пособие / А. И. Власов, А. В. Назаров.* — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. (Библиотека “Наноинженерия”). — 144 с.

Константин Александрович Андреев — аспирант кафедры “Проектирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н. Э. Баумана;

☎ (499) 263-65-53

E-mail: kost87@mail.ru

Юрий Николаевич Тиняков — главный конструктор СКБ “Сенсорные системы” НОЦ “Нанотехнологические системы и микроэлектроника” МГТУ им. Н. Э. Баумана;

☎ (499) 263-65-53

E-mail: tinjakov48@mail.ru

Вадим Анатольевич Шахнов — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой “Проектирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н. Э. Баумана, член-корреспондент РАН.

☎ (499) 263-65-52

E-mail: shakhnov@iu4.bmstu.ru

Иллюстрации

к статье К. А. Андреева, Ю. Н. Тинякова, В. А. Шахнова

“Математические модели гибридных чувствительных элементов датчиков давления”

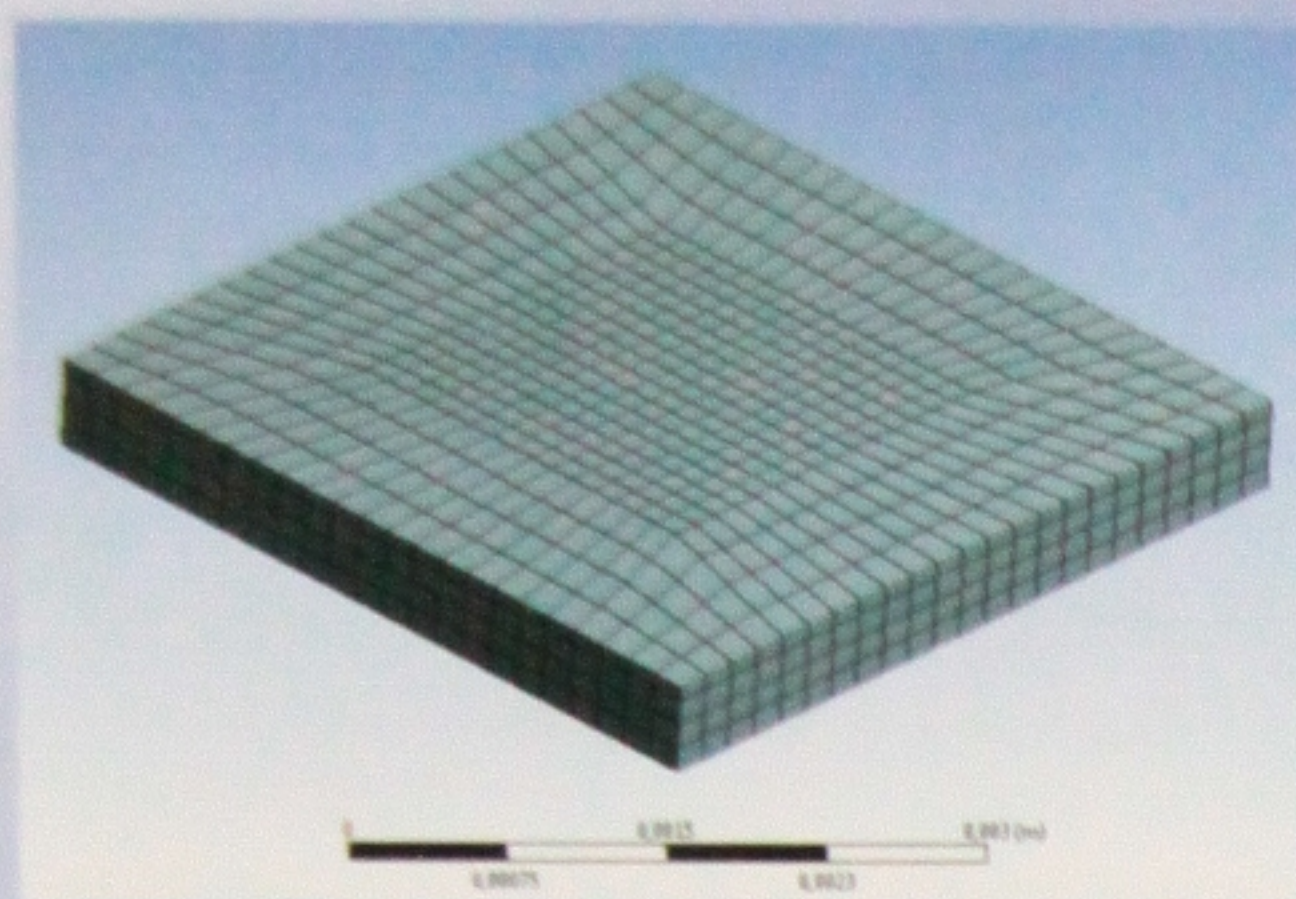


Рис. 2. Сетчатая модель мембраны

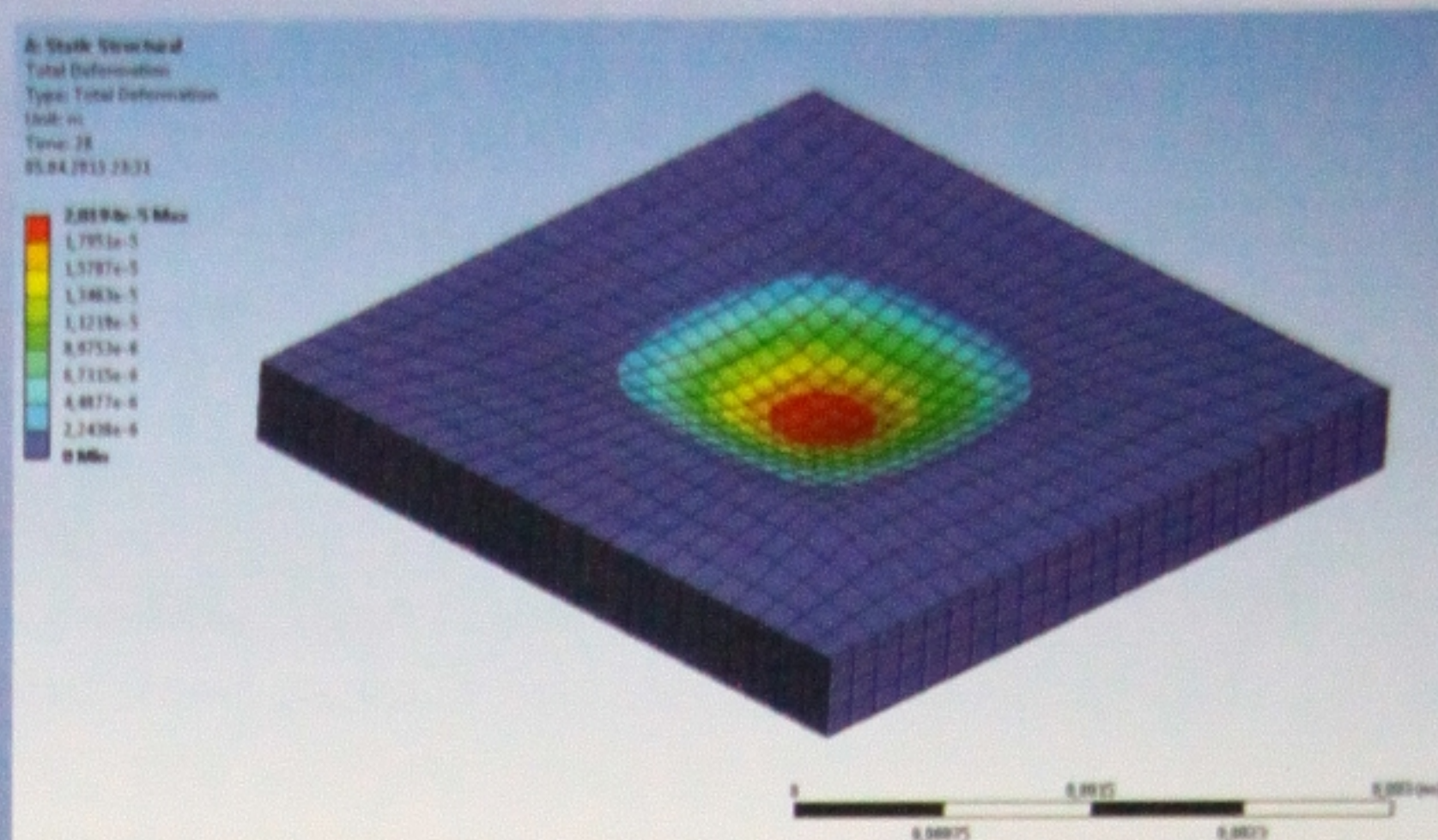


Рис. 3. Суммарные перемещения нагруженной площадки кремниевой мембраны без жесткого центра

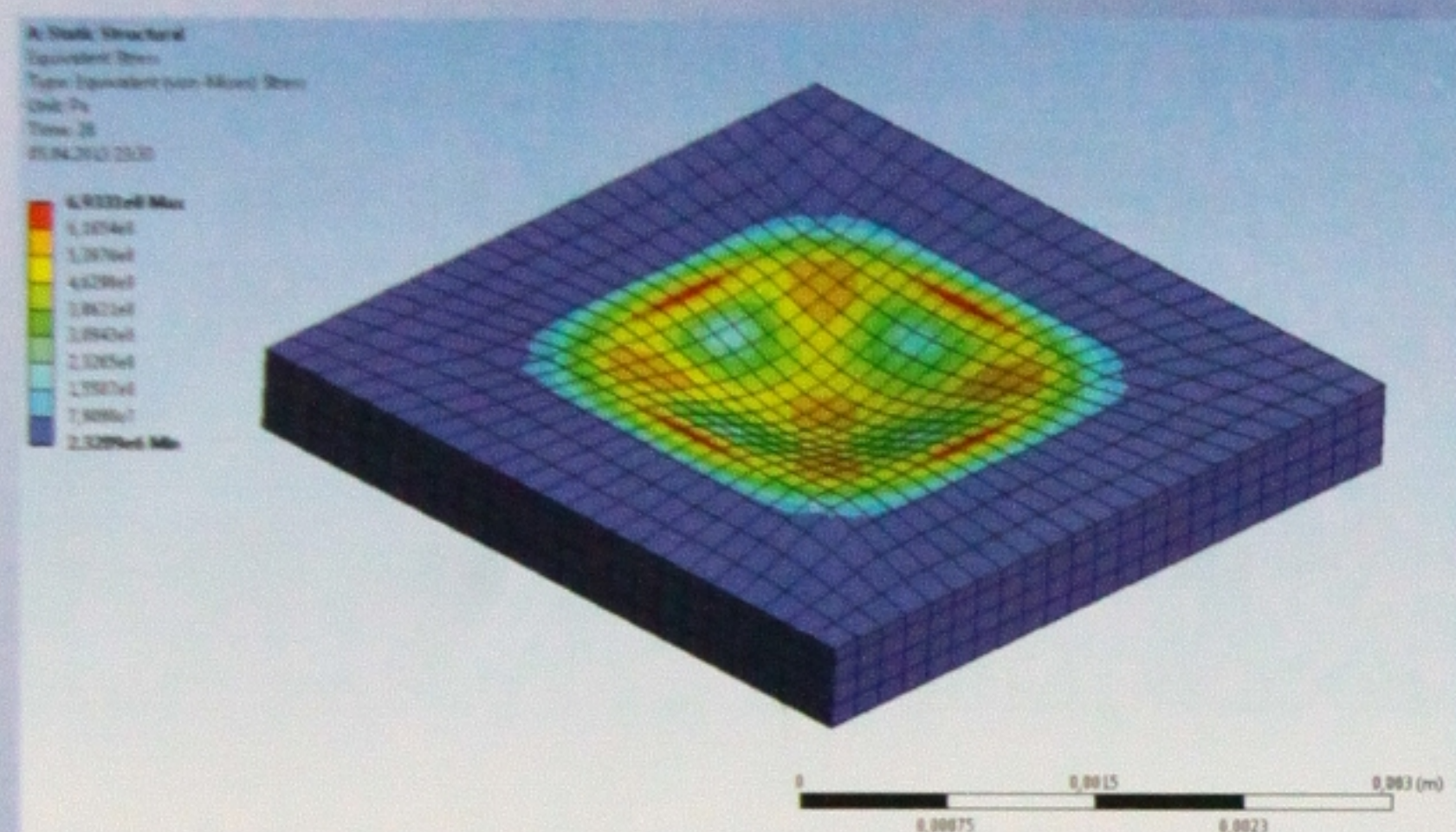


Рис. 4. Вид распределения значений относительной упругой деформации по поверхности мембраны

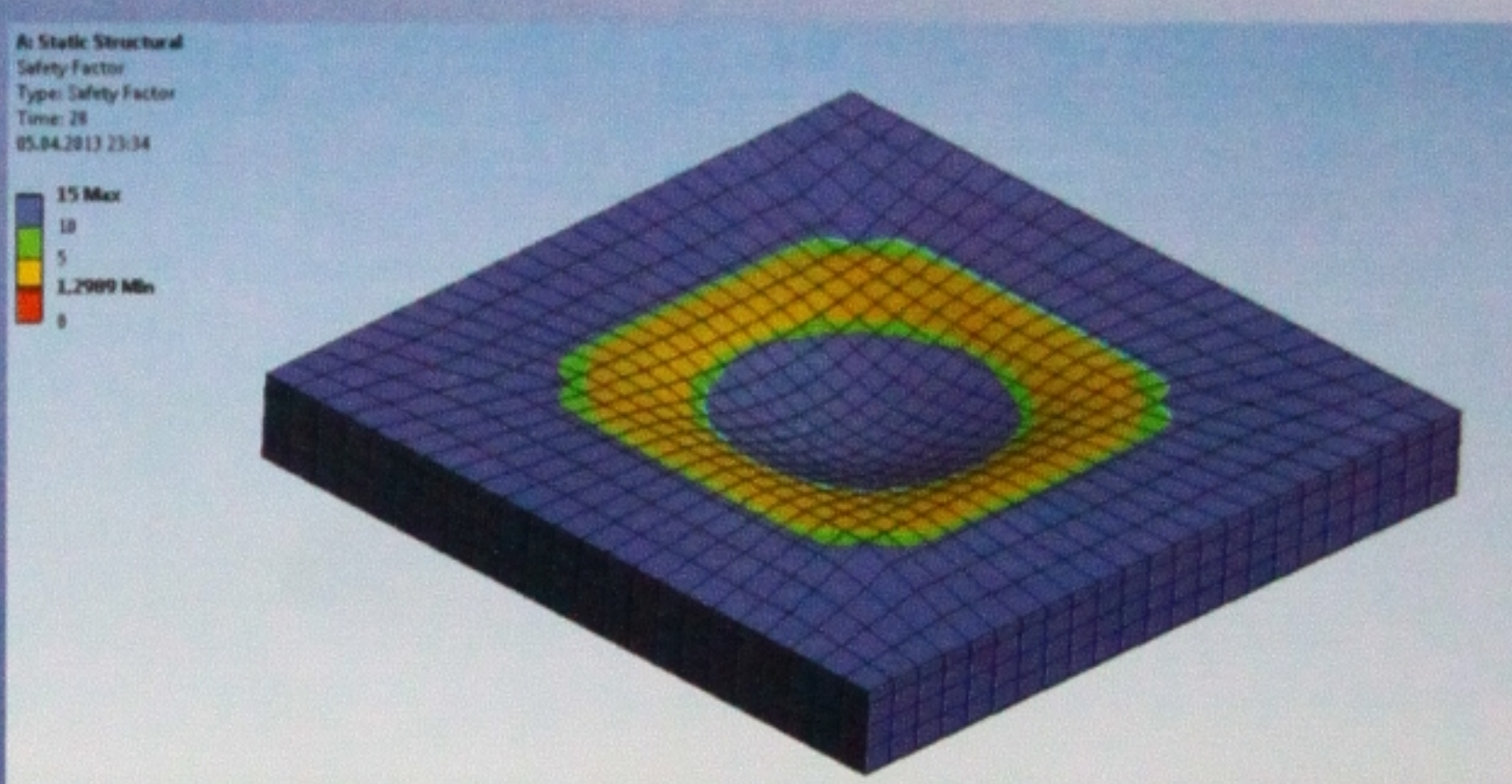


Рис. 5. Анализ по критерию прочности на растягивающие напряжение

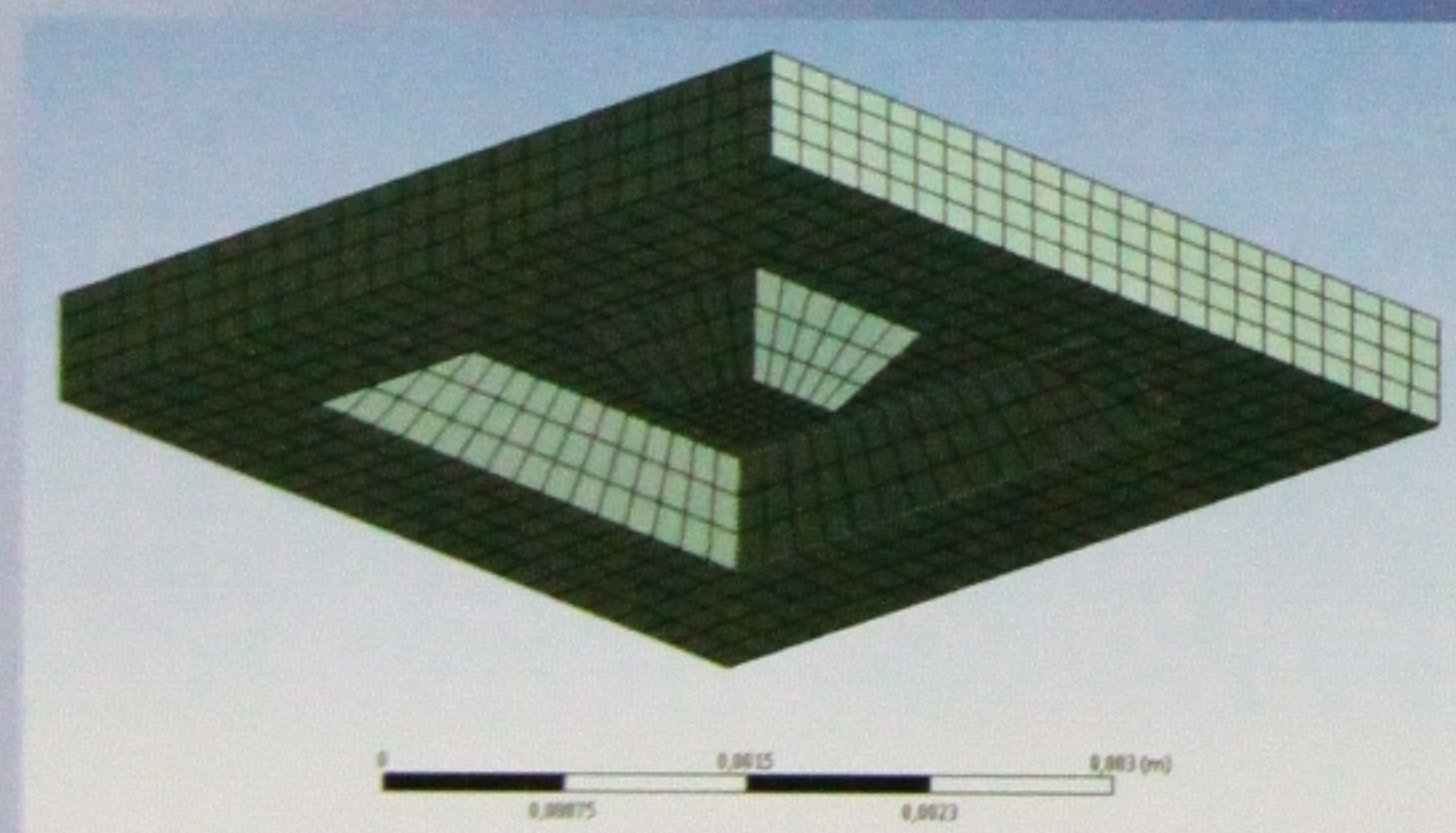


Рис. 7. Перевернутое изображение кремниевой мембраны с жестким центром

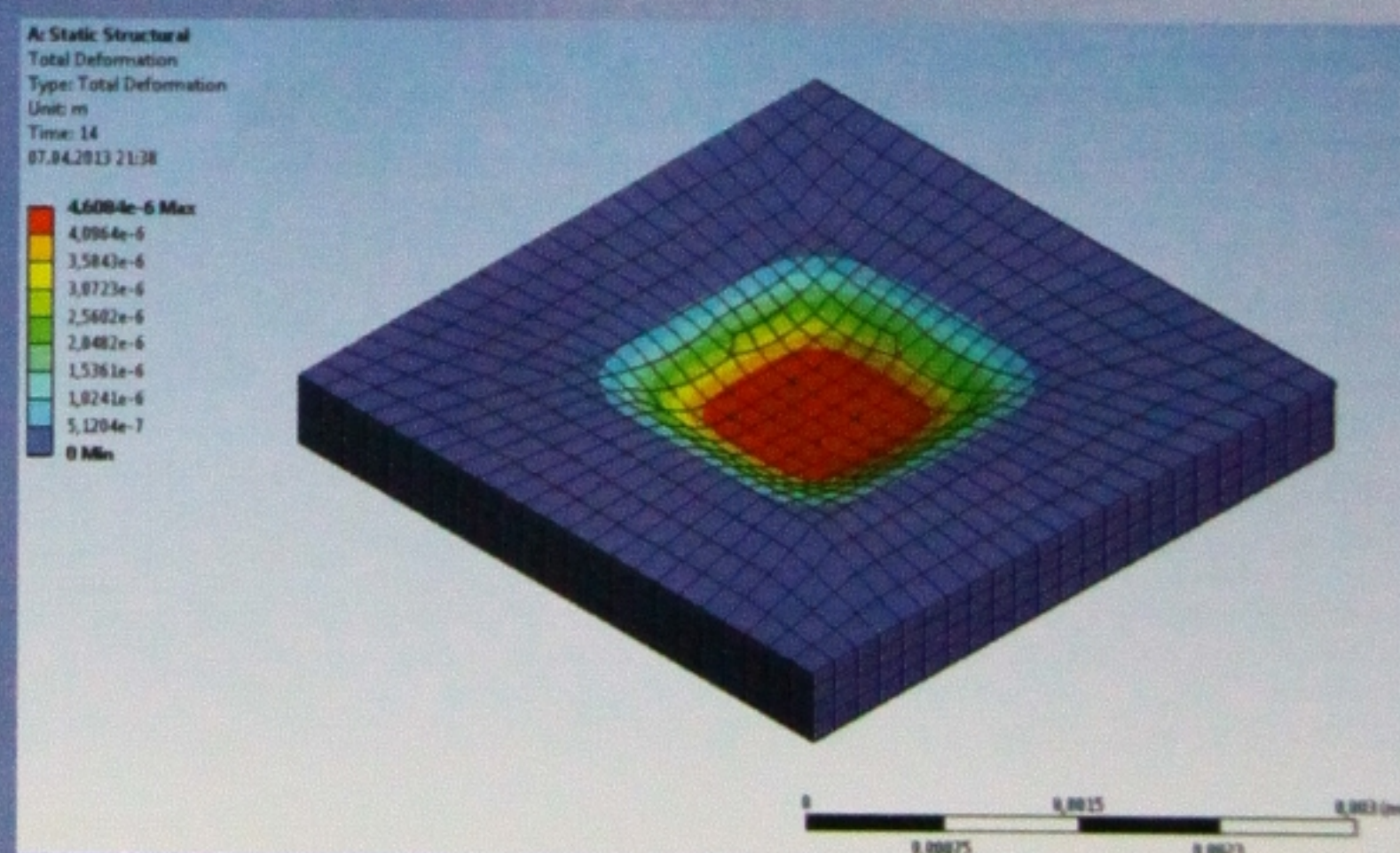


Рис. 8. Суммарные перемещения нагруженной площадки кремниевой мембраны с жестким центром

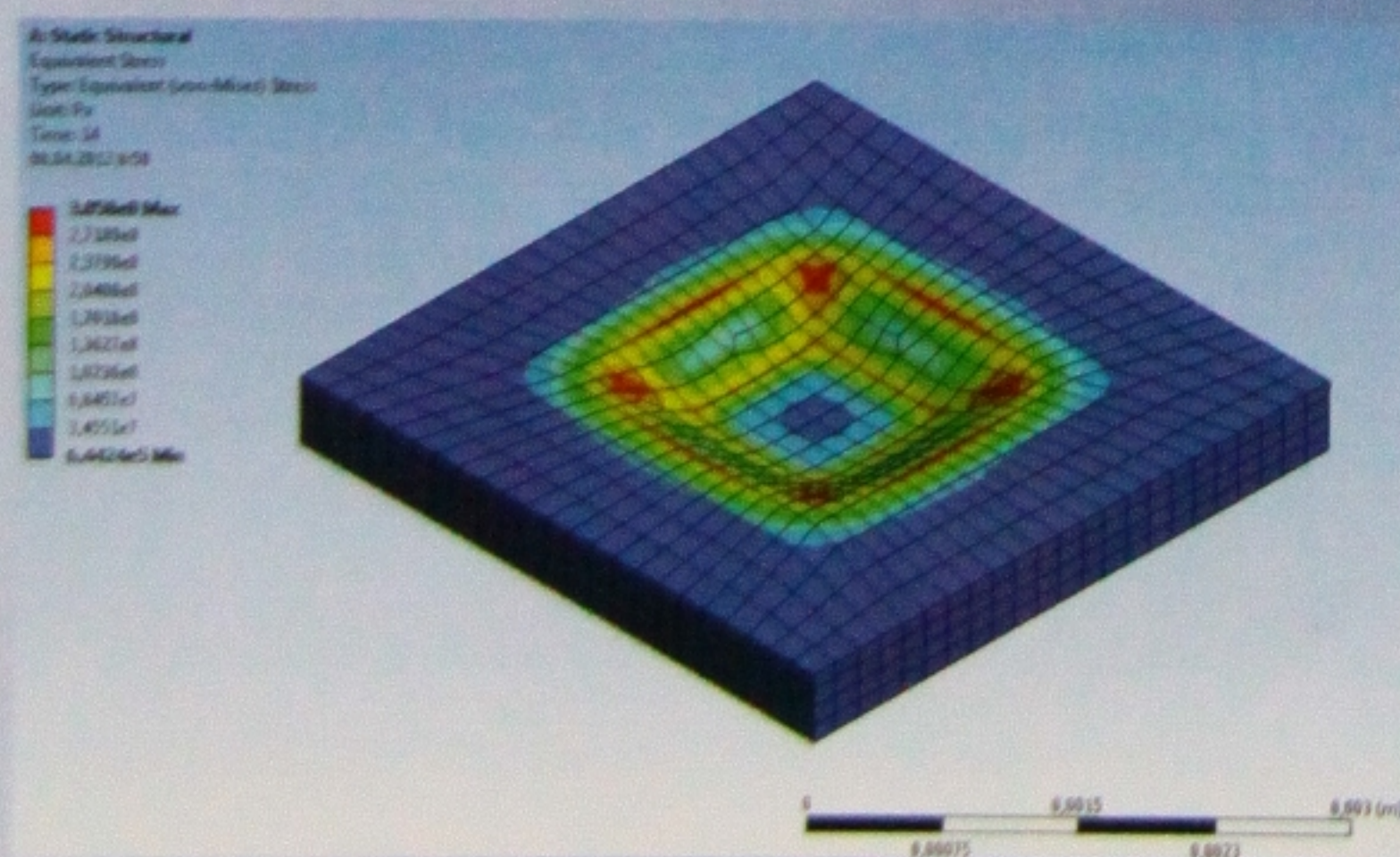


Рис. 9. Вид распределения значений суммарного напряжения по поверхности мембраны

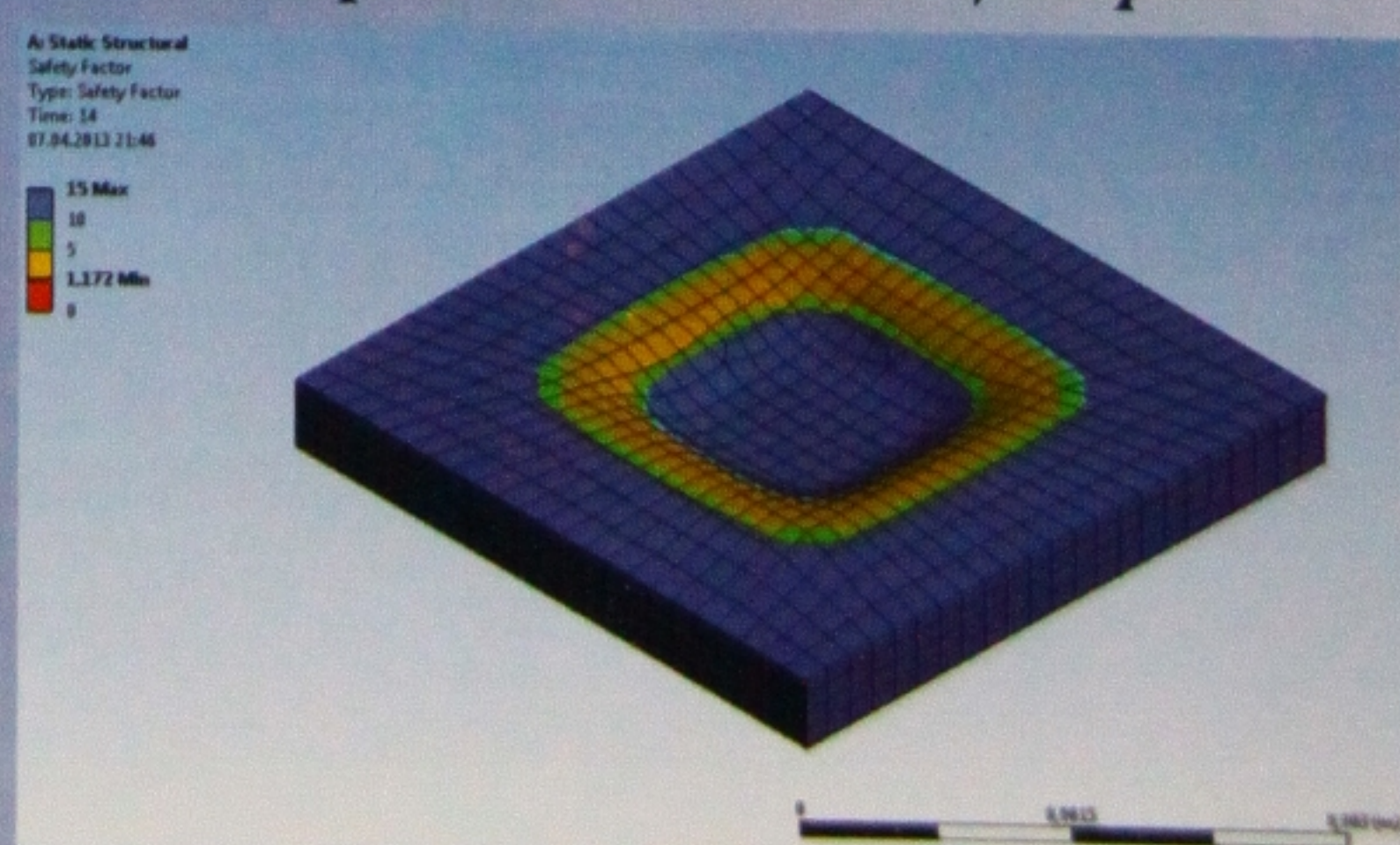


Рис. 10. Расчет по критерию прочности на растягивающее напряжение



СКБ «Сенсорные системы»
Научно-образовательный центр
«Нанотехнологические системы и нанoeлектроника»

СКБ «Сенсорные системы» НОЦ «Нанотехнологические системы и нанoeлектроника» кафедры «Проектирование и технология производства ЭА» МГТУ им. Н.Э. Баумана выпускает линейки сенсорных систем:

- датчики избыточного и абсолютного давления;
- датчики разряжения;
- датчики разности давлений;
- датчики разряжение-давление для измерения малых давлений и высоких давлений;
- датчики силы на основе кремниевых тензопреобразователей;
- оптические датчики на основе интерферометров Фабри-Перо и кристаллов с фотонной запрещенной зоной;
- биосенсоры.

Датчики предназначены для работы в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами, в приборах измерения уровня, расхода, силы и обеспечивают непрерывное преобразование значения измеряемого параметра в унифицированный токовый сигнал дистанционной передачи.

Датчики могут применяться как индикационные приборы в системах автоматического контроля и управления процессами в самых разных отраслях промышленности.



ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ (до 600 Атм)
СЕАЖ-ДИУ-600М

Датчик с защитной мембраной для измерения избыточного давления в диапазоне 0...60 МПа для агрессивных жидкостей и газов.
Универсальный токовый выход 4...20 мА



СЕНСОР МАЛОГО ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ
СЕАЖ-ДИ-10К

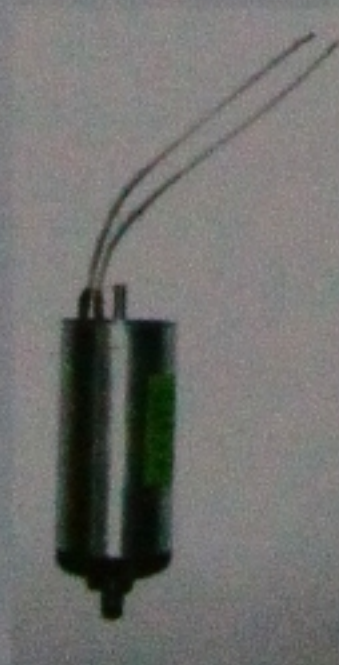
Сенсор разности давления без усилителя.
Габаритные размеры 12×12×16 мм
Диапазон измерения 0...10 кПа
Диапазон рабочих температур от -45 до +120 °С
Сохраняет работоспособность без гарантии сохранения точностных характеристик в диапазоне от -60 до +140 °С
Начальный сигнал 0...1 мВ
Выходной сигнал 40...60 мВ



СЕНСОР АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ
СЕАЖ-ДА-600К

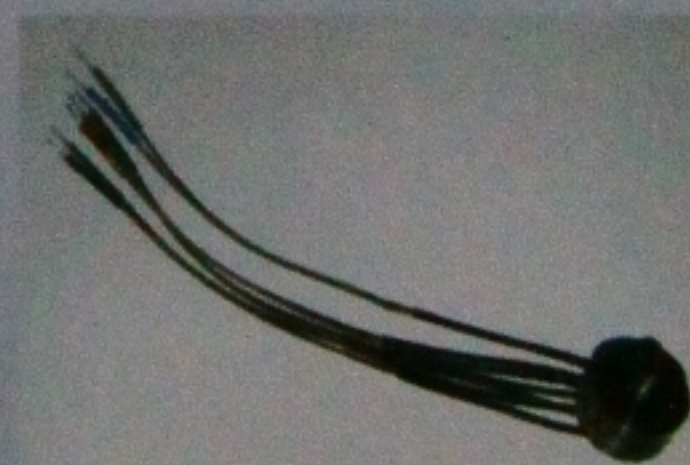
Сенсор абсолютного давления без усилителя.
Габаритные размеры 16×16×20 мм; (резьбовое соединение М5×1)
Диапазон измерения 0...600 кПа, 0...—90 кПа
Диапазон рабочих температур от -45 до +120 °С

Сохраняет работоспособность без гарантии сохранения точностных характеристик в диапазоне от -60 до +140 °С
Начальный сигнал 0...5 мВ
Выходной сигнал 40...60 мВ



ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ (до 10 кПа)
СЕАЖ-ДИУ-10К

Датчик избыточного давления в диапазоне 0...10 кПа для агрессивных жидкостей и газов.
Универсальный токовый выход 4...20 мА



СЕНСОР РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЯ
СЕАЖ-ДР-200К

Сенсор разности давления без усилителя.
Габаритные размеры 29×29×12 мм

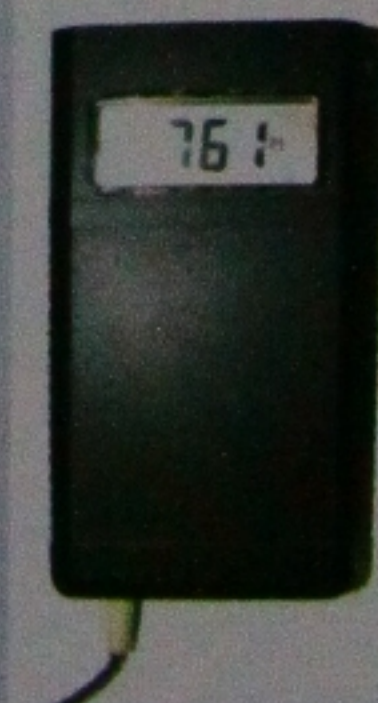
Диапазон измерения 0...200 кПа
Диапазон рабочих температур от -40 до +100 °С
Начальный сигнал 0...4 мВ
Выходной сигнал 40...60 мВ



МНОГОТОЧЕЧНЫЙ СЕНСОР ДАВЛЕНИЙ
СЕАЖ-ЧДИ-100К

Многоточечный сенсор давлений содержит 16 чувствительных элементов.
Диапазон измерения 0...100 кПа
Диапазон рабочих температур от -45 до +120 °С

Сохраняет работоспособность без гарантии сохранения точностных характеристик в диапазоне от -60 до +140 °С
Начальный сигнал 0...1 мВ
Выходной сигнал 40...60 мВ



ДАТЧИК АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ С ЦИФРОВЫМ ИНДИКАТОРОМ
СЕАЖ-ДАЦ-1М

Датчик абсолютного давления с цифровым индикатором для измерения атмосферного давления.
Диапазон измерения 0...1 МПа
Диапазон рабочих температур от -45 до +120 °С

По Вашему заказу мы можем изготовить датчик с определенными характеристиками (диапазон входных давлений), соединениями (штуцеры и т.п.) и выходным сигналом (токовая петля, вольтный выход и т.п.).

105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская 5, стр.1 «ИУ4»
тел.: 8-965-3083140, 8-916-2526008, sensors@iu4.ru, <http://nanotech.iu4.bmstu.ru>