

На правах рукописи  
УДК 621.3.049.779

Андроник Михаил



**Метод синтеза базовых технологических процессов  
микроэлектромеханических систем  
на основе конструктивно-технологической онтологии**

Специальность 05.27.06 - Технология и оборудование для полупроводниковых  
материалов и приборов электронной техники

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель

доктор технических наук,  
профессор **Цветков Юрий Борисович**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор **Панасюк Виталий Николаевич**,  
Главный контролер-директор по управлению  
качеством и технической поддержке  
(Научно-исследовательский  
институт молекулярной электроники)

кандидат технических наук,  
доцент **Нестеренко Тамара Георгиевна**,  
Отделение электронной инженерии  
(Томский политехнический университет)

Ведущая организация:

**АО «Российские космические системы»**

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.18 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.18  
кандидат технических наук, доцент



Мешков С.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Стремительные темпы четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0) определяются уровнем развития прорывных критических технологий в стратегических областях исследований и разработок – от нанотехнологий до искусственного интеллекта, мехатроники, робототехники, аддитивных технологий, возобновляемой энергетики и других. Концепция Индустрии 4.0 предусматривает сквозную цифровизацию всех физических процессов, их интеграцию в цифровую экосистему, насыщенную множеством разнообразных приборов, датчиков, актуаторов, которые объединены в единую сеть посредством различных каналов связи. Особое значение в таких распределенных многоуровневых системах имеют микроэлектромеханические системы (МЭМС). Это сенсоры и актуаторы, изготовленные преимущественно на основе кремния с использованием групповых методов обработки на основе технологий микроэлектроники. Кремний, благодаря сочетанию уникальных полупроводниковых и механических свойств, позволяет создавать обширную номенклатуру МЭМС. Разработанный за последние 40 лет широкий спектр микроминиатюрных чувствительных элементов сенсоров и актуаторов позволил сформировать значительный конструкторско-технологический задел для перспективных изделий, в частности, для аэрокосмической и оборонной промышленности, при создании беспилотных автомобилей, дронов, роботов и т.д. При этом МЭМС устройства обладают колоссальным потенциалом миниатюризации, а применяемые технологии их массового производства легко интегрируются с процессами микроэлектроники, многокристальной сборки, «флип-чип» технологией и т.п.

Большой вклад в развитие и изучение МЭМС направления внесли фундаментальные работы К. Петерсона, Х.А. Ваггенера, М. Тилли, Р. Годси. Существенный вклад в разработку отечественных МЭМС технологий внесли научные группы Лучинина В.В. (СПбГЭТУ (ЛЭТИ)), Пятышева Е.Н. (ФГАОУ ВО «СПбПУ»), Чаплыгина Ю.А., Тимошенкова А.С, Саурова А.Н. (НИУ МИЭТ), Учайкина С.В., Нестеренко Т.Г. (ФГАОУ ВО НИ ТПУ), Коновалова С.Ф. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Мальцева П.П. (ИСВЧПЭ РАН), Лукичева В.Ф. и Орликовского А.А. (ФТИАН). В настоящее время в РФ созданы предпосылки для быстрого развития технологии МЭМС. В последние годы растет и количество современных производственных площадок для изготовления МЭМС в России. В ОАО «Маппер» создан технологический кластер для изготовления МЭМС изделий, успешно функционируют лаборатория Микроприборов в МИЭТ, ориентированная на разработку и изготовление инерциальных датчиков, лаборатория технологии микро- и наносистемной техники во ФТИАН; в НОЦ «ФМНС» ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» и МГТУ им. Н.Э. Баумана активно развиваются технологии МЭМС, МОЭМС и микрофлюидных «лабораторий-на-чипе».

Одной из основополагающих проблем создания МЭМС является высокая стоимость и большая длительность жизненного цикла их разработки, что особенно проявляется при изготовлении прототипов в условиях опытного производства. Это объясняется недостаточной междисциплинарной проработкой алгоритмов

разработки МЭМС, низким уровнем стандартизации конструктивно-технологических аспектов МЭМС, что ведет к узконаправленному проектированию каждого нового изделия и разработке индивидуального процесса его изготовления. Это повышает стоимость разработок новых МЭМС продуктов и удлиняет сроки их внедрения на рынок.

Обеспечение нужд новой индустриальной парадигмы требует создания развитого конструктивно-технологического обеспечения последовательных и неразрывно связанных процессов разработки и изготовления сенсоров и актуаторов на основе МЭМС.

**Целью диссертационной работы** является создание системы научно обоснованных методов повышения эффективности разработки и изготовления новых типов изделий МЭМС на основе онтологического подхода.

**Решаемые задачи:**

1) комплексный конструктивно-технологический анализ современного уровня развития МЭМС, охватывающий широкую номенклатуру МЭМС изделий и процессов ведущих мировых производителей;

2) разработка метода синтеза базовых маршрутных технологических процессов изготовления МЭМС на основе сравнительного анализа методов проектирования новых устройств в областях МЭМС, микроэлектроники и машиностроения;

3) выделение на основе конструктивно-технологической онтологии основных классов МЭМС изделий, которые могут быть изготовлены в едином маршрутном технологическом процессе (МТП);

4) синтез базовых МТП изготовления перспективных МЭМС изделий различных типов, включая МЭМС переключатели, электрические переключатели, гироскопы и акселерометры, а также микрофлюидные «лаборатории-на-чипе»;

5) моделирование конструкций базовых элементов выделенного класса МЭМС, включая элементы схем линейных перемещений, бистабильных элементов, встречно-штыревых и шевронных актуаторов;

6) моделирование процесса фотолитографии толстых резистов для формирования топологии элементов с учетом трехмерной структуры изделий МЭМС;

7) разработка основных технологических операций синтезированного МТП процесса;

8) экспериментальная апробация синтезированного базового МТП на примере изготовления МЭМС различных типов.

**Методы исследования.** Работа основана на индуктивно-эмпирическом подходе и базируется на анализе тематических исследований в литературе, экспертных дискуссиях и экспериментальной апробации в промышленности. Для достижения поставленных задач проведено более 250 экспериментальных партий, обеспечена равномерность результатов технологических процессов на 100 мм кремниевых пластинах. Результаты исследований обработаны методами дисперсионного анализа. Для контроля параметров технологических процессов применены: электронная и оптическая микроскопия для измерения линейных размеров и исследования профиля структур в сколе; рефлектометрия и

эллипсометрия для измерения толщины тонких пленок и фоторезистов. При решении задач использованы теория оптимизации и математическая статистика.

#### **Научная новизна работы:**

1. Концептуально обоснована и проведена конструктивно-технологическая систематизация основных видов изделий МЭМС и процессов их изготовления, заключающаяся в классификации перспективных изделий МЭМС по подвижности их базовых элементов и группировании процессов ведущих мировых производителей по признаку используемых групп операций, что позволяет выявить общие признаки их разработки и изготовления.

2. Разработан метод синтеза базовых маршрутных технологических процессов изготовления МЭМС, основанный на формировании конструктивно-технологической базы знаний, отличающейся семантической структурой информационных блоков конструкций и технологий изготовления МЭМС, содержащей онтологические классы изделий и позволяющей объединить различные по принципу действия изделия с общими базовыми элементами в рамках единого процесса изготовления.

3. Проведено математическое моделирование механических характеристик упругих и бистабильных элементов в широком диапазоне их геометрических параметров, а также электростатических и термических актуаторов МЭМС для определения минимальных размеров их элементов в зависимости от толщины кремниевой пластины, что позволяет оценить технологическую реализуемость конструкции и использовать полученные данные для создания библиотек элементов.

4. Для основной операции формирования топологии элементов МЭМС, фотолитографии толстых резистов, выявлена зависимость от толщины и оптических свойств фоторезиста для оценки предельного угла наклона стенок профиля фоторезистов, основанная на пороговом моделировании и заключающаяся в аппроксимации дифракционных явлений пространственного изображения вглубь толщины слоя фоторезиста.

#### **Практическая значимость и результаты внедрения.**

Комплексный подход к разработке и изготовлению МЭМС изделий, базовый маршрутный технологический процесс, алгоритмы и модели внедрены при выполнении НИОКР, проводимых МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» (Госкорпорация «Росатом»). На основе созданной методики, разработанных технологических операций и базового маршрутного технологического процесса изготовлены новый тип переключателей с пассивными элементами, инерциальные сенсоры, оптический датчик вибрации, микрофлюидные «лаборатории-на-чипе», а также МЭМС-структуры для элементной базы квантовых вычислителей в рамках реализации крупнейших российских проектов Фонда перспективных исследований.

Полученные математические модели, методики и комплекс модельных исследований процессов экспонирования толстых резистов внедрены в учебный процесс кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы** подтверждена результатами проведенных экспериментальных исследований, согласованностью теоретических и экспериментальных результатов, а также внедрением разработанных методик и режимов работы технологического оборудования в НИР, проводимых НОЦ «ФМНС» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Выделение групп изделий МЭМС, подобных по конструктивным и технологическим признакам, и синтез базовых МТП для таких групп возможно на основе семантически организованных баз знаний с онтологической структурой для выявления взаимосвязей между базовыми конструкциями и МТП изготовления МЭМС. Это позволяет осуществлять быстрый запуск серийного изготовления разнородных типов МЭМС изделий, объединенных по конструктивно-технологическому принципу.

2. Формирование функциональных моделей изделий МЭМС путем моделирования конструктивных элементов и ключевых процессов их изготовления позволяет сформировать перечень элементов, конструктивно и технологически реализуемых в рамках единого базового МТП, с последующей экспериментальной апробацией варианта МТП для коррекции модели.

3. Для получения контролируемых профилей в толстых слоях фоторезистов (до 100 мкм), применяемых при формировании многоаспектных элементов МЭМС, пороговое моделирование процесса фотолитографии с учетом дифракционных явлений по глубине фоторезиста, позволяет оценить влияние коэффициента поглощения и толщины фоторезиста на получаемый угол профиля в структуре фоторезиста, причем коэффициент поглощения дает наибольший вклад при формировании пространственного изображения в фоторезисте.

4. Разработанный и апробированный базовый МТП, синтезированный на основе онтологического подхода, позволяет изготавливать разнородные по принципу действия МЭМС изделия на стеклянных и кремниевых подложках, в частности, электрические и оптические переключатели, инерциальные системы (гироскопы и акселерометры) и микрофлюидные «лаборатории-на-чипе», что обеспечивает расширение номенклатуры и повышение эффективности разработки и внедрения перспективных МЭМС.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на научных семинарах ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», семинарах кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также российских и международных конференциях: Будущее машиностроения России (Москва, 2016), PIERS (Санкт-Петербург, 2017), SPIE Saratov Fall Meeting (Саратов, 2018), APS March Meetings (Бостон, 2019), IS3C – Single-Molecule Sensors and NanoSystems 2019 (Мюнхен, 2019), ITEE-2019 – International forum «IT-technologies for engineering education: new trends and implementing experience, (Москва, 2019), «Биотехнология: состояние и перспективы развития. Науки о жизни» (Москва, 2019), APS March Meetings (Бостон, 2020), Моделирование сложных технических систем (Москва, 2020).

**Публикации.** Основное содержание работы опубликовано в 8 научных публикациях, из которых 4 – в изданиях Scopus и 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Личный вклад.** Автор самостоятельно провел поиск и анализ литературы, разработал последовательность структурирования информации по теме диссертации на основе онтологического подхода. Разработал, провел планирование и экспериментальную апробацию базового МТП изготовления структур МЭМС. Сочетал работу исследователя, технолога, оператора, экспериментатора и конструктора. Отработал процессы фотолитографии, технологические параметры нанесения слоев, экспонирования и проявления, обеспечивающие равномерность и повторяемость процесса для фоторезистов толщиной от 0,5 до 50 мкм, руководил выполнением всех операций в рамках базового МТП МЭМС. Лично провел все расчеты, получил результаты моделирования и подготовил все графические иллюстрации, представленные в диссертационной работе.

#### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 183 страницах, содержащих 136 рисунка, 25 таблиц и список литературы из 222 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность решения поставленных в диссертации задач, сформулированы цель и задачи исследования, обоснована научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава посвящена** комплексному сравнительному анализу технологических процессов изготовления МЭМС ведущих мировых производителей, в результате которого выделены два типа процессов: универсальные и специализированные. Производственные компании преимущественно используют специализированные процессы, а исследовательские университеты, напротив, нацелены на универсальные процессы, обеспечивающие широкий охват типов изделий. На основе проведенной систематизации процессов (Рис. 1) показано, что, несмотря на схожесть в них групп технологических операций, их последовательности и требования к ним существенно отличаются. На основе анализа конструкций изделий МЭМС проведена их систематизация по критерию подвижности базовых элементов. Выделено три класса МЭМС изделий: неподвижные, изгибающиеся и контактирующие. К неподвижным МЭМС изделиям относятся сенсоры и актуаторы без механических элементов, например, сенсоры газа, болометры или некоторые микрофлюидные устройства.

Множество видов изделий, таких как инерциальные датчики (акселерометры и гироскопы), оптические сенсоры и актуаторы, осцилляторы, имеют в своем конструктиве изгибающиеся элементы. Изделия на основе контактирующих поверхностей обеспечивают формирование электрического контакта, а механизмы с заделкой элементов обеспечивают пассивность стабильных положений для электрических и оптических МЭМС переключателей.

Разработчик	Название процесса	Подложки			Si		SiO <sub>2</sub> герметичный	CVD			PVD			AlN, PZT	Политрование	Соединение пластин			Особые процессы	
		Кремний	КИН	Стекло	DRIE	КОН		LPCVD	LPCVD	PECVD	Металлы					прямое	анодный	адгезионный	полимеры	пары HF, XeF
							Au, Pt				Al, Mo, Ni	Ni (талъв.)								
Специализированные	Avago	FBAR																		
	Knowles	Microphone																		
	SiTime	Resonator																		
	Draper	Gyroscope																		
	STMicroelectronics	Thelma																		
	Novasensor	Pressure Sensor																		
	Ford Microelectronics	Bulk Accelerometer																		
	Infotonics	Hybrid MEMS																		
	MEMtronics	RF MEMS Switch																		
	Texas Instruments	DLP																		
	Xerox	Thermal Inkjet																		
Honeywell	Microbolometer																			
Универсальные	MEMSCap	PolyMUMPS																		
	MEMSCap	SOIMUMPS																		
	MEMSCap	MetalMUMPS																		
	Sandia	SUMMIT V																		
	Cornell University	SCREAM																		
	University of Michigan	HARPSS																		
	University of Michigan	Silicon-on-Glass																		
	University of Michigan	Plastic MEMS																		
CAMD	LIGA																			

□ Не используется    ▨ Используется    ■ Используется с повышенными технологическими показателями

Рис. 1. Систематизация технологических процессов изготовления МЭМС изделий по группам операций

Главной конструктивной особенностью МЭМС изделий является большое количество конструктивных элементов, основанных на различных физических эффектах. Это ограничивает попытки унификации и систематизации технологий и конструкций, применяемых при изготовлении МЭМС изделий.

**Во второй главе описаны принципы построения методики разработки новых МЭМС изделий с целью сокращения длительности их разработки на основе формирования базы знаний процессов и изделий.**

Системный сравнительный анализ методов разработки новых изделий показал конструктивную схожесть МЭМС с технологиями машиностроения, что позволило использовать в качестве основы инструмент «Структурирование функций качества» (QFD), в котором требования, параметры, конструкции, ключевые операции и выбор МТП осуществляются через построение «домов качества», в которых экспертным мнением согласуются весовые коэффициенты. Технологическая схожесть МЭМС с микроэлектроникой обуславливает необходимость проведения параллельного анализа геометрии, структуры и функционирования изделия, что позволяет разделить работу различных инженеров, что возможно путем создания базы знаний базовых элементов и базовых МТП, а не операций, как в случае стандартного подхода QFD.

Представление информации в виде онтологии, устанавливающей семантические связи между конструктивными и технологическими информационными разделами, позволяет обеспечить выделение основных классов

и концептов предметной области, что способствует синтезу наиболее рационального МТП.

В прикладном инженерном контексте онтология представляет собой спецификацию основных концептов и понятий рассматриваемой системы, при этом каждому концепту задается свой идентификатор и обозначаются типы связи между ними, позволяющие представить процесс проектирования и изготовления МЭМС изделий в виде концептуальной модели (Рис. 2).

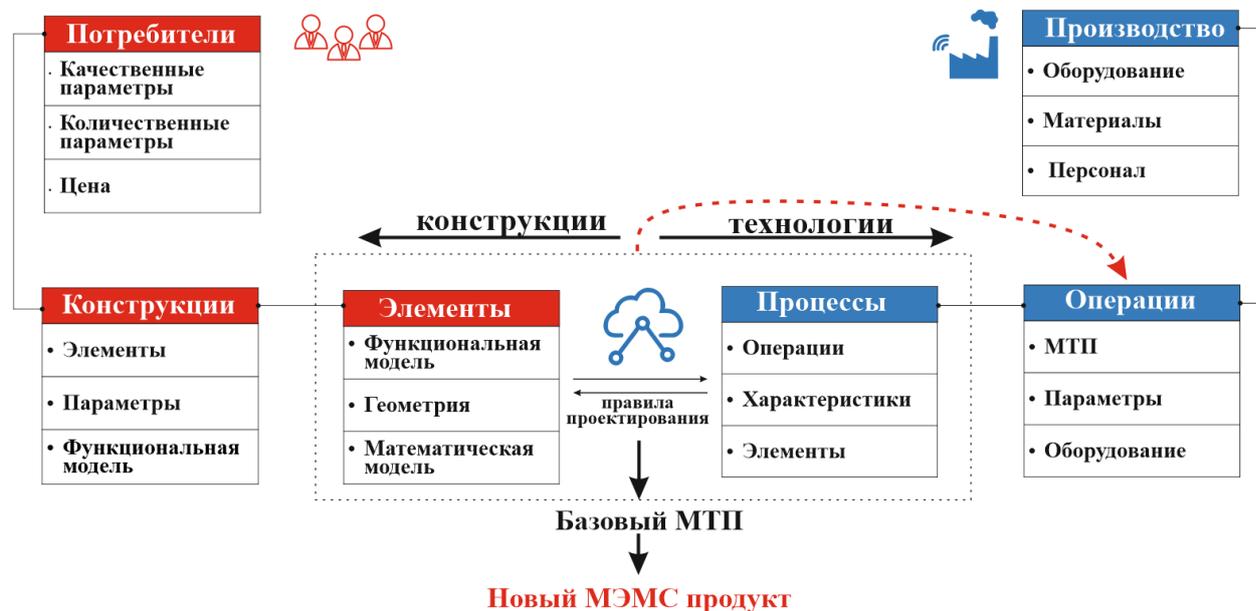


Рис. 2. Концептуальная модель разработки новых МЭМС изделий

Создание онтологии на платформе Protégé (Рис. 3) позволяет не только обозначить ключевые семантические связи между концептами, но и облегчить выявление структуры базового технологического процесса, наиболее удовлетворяющего входным параметрам проектируемого изделия.

В работе предметная область МЭМС была впервые комплексно и системно рассмотрена как единое целое. На основе совместного анализа конструктивных и технологических аспектов этой предметной области, проведено обобщение информации: выделены характерные конструктивные элементы МЭМС, а также варианты универсальных технологических процессов, наиболее отработанных в современной технологии МЭМС. Данная структура формирует матрицу проектирования МЭМС с тремя уровнями проектирования и тремя областями: конструктивной, функциональной и технологической. Представлен фрагмент онтологии, которая позволила определить связи между конструкциями и элементами изделий, схожими по конструктивному принципу (Рис. 4).

Выделено несколько классов изделий, которые схожи по конструктивному принципу и могут быть изготовлены на основе базовых МТП, а именно: 1) устройства поверхностной механики; 2) оптические сенсоры и оптические переключатели; 3) мембранные поверхностные и объемные сенсоры; 4) СВЧ резонаторы и осцилляторы; 5) поверхностные переключатели, состоящие из оптических модуляторов, СВЧ переключателей и устройства на их основе; и 6) микрофлюидные устройства.

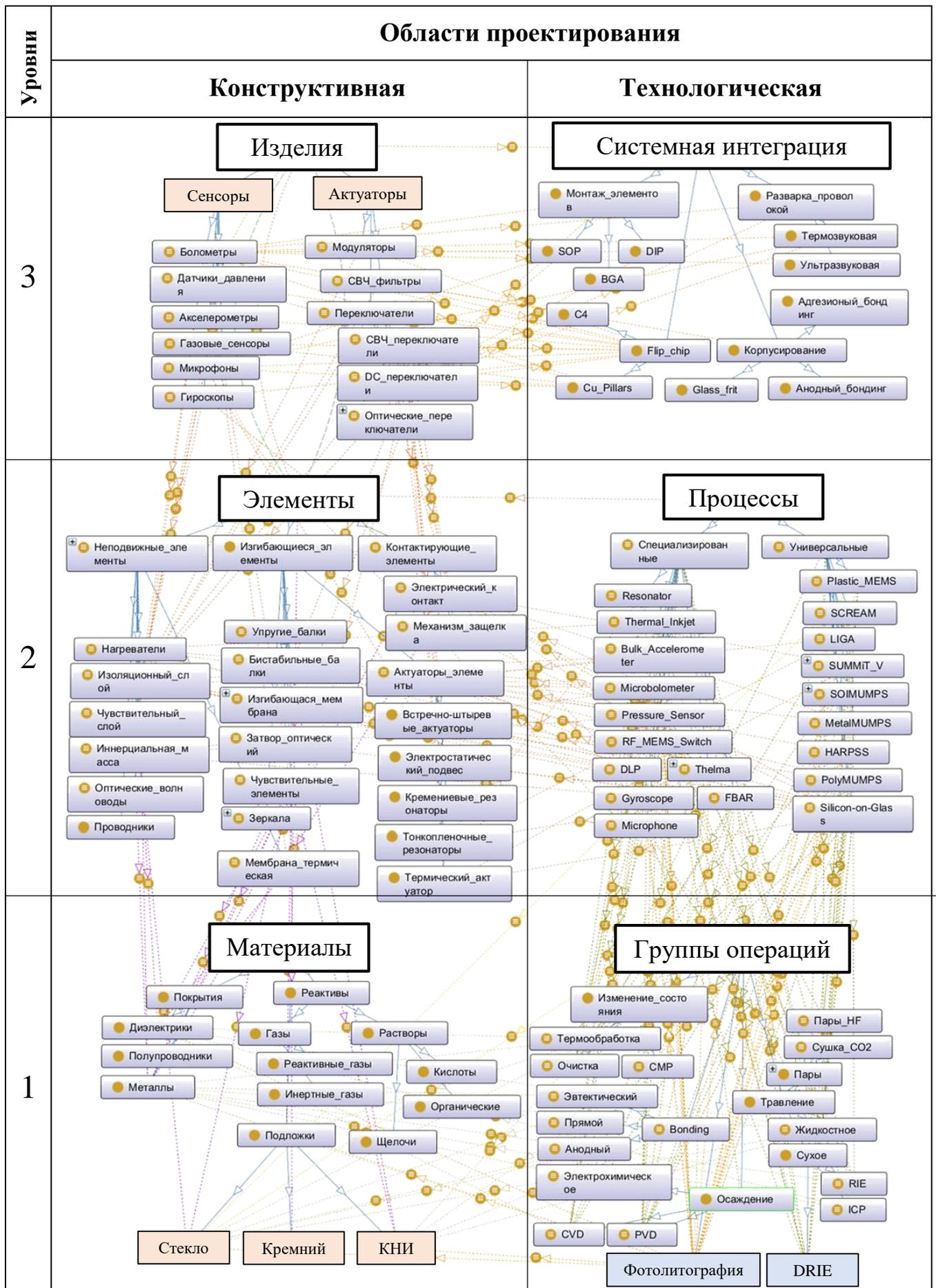


Рис. 3. Фрагмент конструктивно-технологической онтологии МЭМС в Protégé

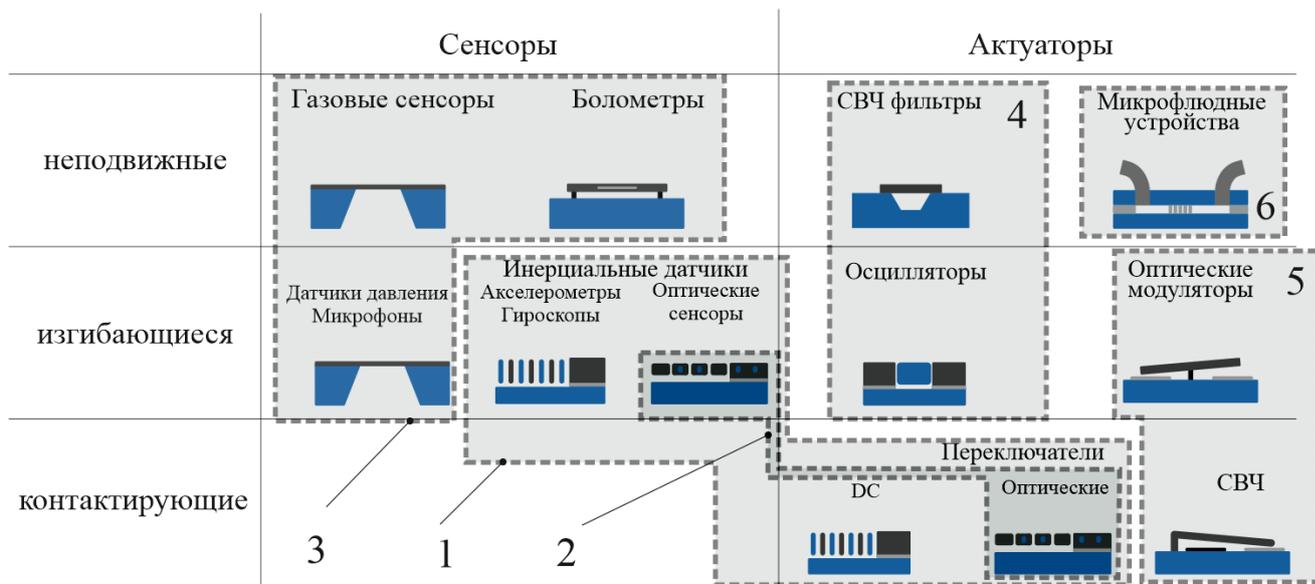


Рис. 4. Формирование групп изделий по критерию используемых базовых элементов

В третьей главе описан пример формирования на основе онтологического подхода одного из перспективных базовых МТП (Рис. 5) изготовления изделий выделенной группы.

№	Группа операций	Возможные последовательности					
1.0	Подготовка стеклянной подложки	—					
1.1	Травление стекла (глубиной 4 - 20 мкм)	—	—				
1.2	Осаждение Cr/Au + травление	—	—	—		—	
2.0	Подготовка кремниевой подложки						
2.1	Травление кремния (обратная сторона)	—		—	—		
3.0	Соединение пластин - Анодный - Эвтектический	—					
2.2	Глубокое травление кремния						—
2.3	Глубокое травление кремния (ступень)			—	—		—
4.0	Удаление жертвенного слоя	—	—	—	—	—	
5.0	Теневое осаждение Cr/Au	—				—	
Типы МЭМС							
		а)	б)	в)	г)	д)	е)

Рис. 5. Комплексный базовый процесс изготовления МЭМС изделий

На основе сформированной онтологии было выявлено три возможных варианта реализации процесса с использованием поликристаллического кремния

(на примере SUMMiT V, PolyMUMPS, THELMA), монокристаллического кремния на кремневой подложке (на примере SOIMUMPS) и монокристаллического кремния на стеклянной подложке (на примере Silicon on glass). Разработанный комплексный базовый МТП позволяет использовать для создания изделий МЭМС широкий диапазон толщин монокристаллического кремния от 5 до 500 мкм и преимущества диэлектрических свойств стекла. В зависимости от выбранной последовательности операций разработанный процесс позволяет изготавливать теневые маски и микроканалы (Рис. 5, а), микрофлюидные «лаборатории-на-чипе» (Рис. 5, б), МЭМС переключатели (Рис. 5, в), гироскопы и акселерометры (Рис. 5, г, д, е).

Травление стекла и дальнейшее соединение (бондинг) пластин позволяет формировать физически развязанные электрические структуры с закрытым геометрическим контуром в кремнии, такие как схемы линейного перемещения (Рис. 6, а) и встречно-штыревые электростатические актуаторы (Рис. 6, б). На основе ступенчатого глубокого травления кремния могут быть изготовлены глухие и сквозные элементы без закрытых контуров, такие как упругие балки, бистабильные элементы, механизмы защелки (Рис. 6, в, г). Дальнейшее осаждение металла теневым способом позволяет создавать термические и шевронные актуаторы (Рис. 6, д, е). Дополнительное травление кремния с обратной стороны кремневой подложки позволяет изготавливать ступенчатые встречно-штыревые структуры.

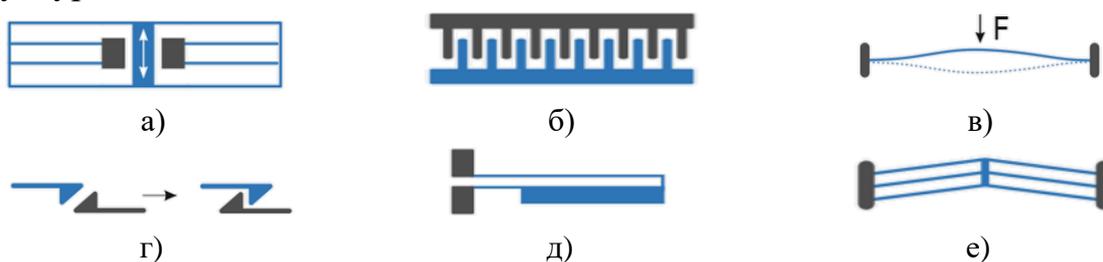


Рис. 6. Основные элементы базового процесса изготовления

Проведено функциональное моделирование упругих кремниевых балок консольного типа и типа заделка-заделка (Рис. 7). Для данных схем закрепления приведены результаты расчета жесткости при толщине кремния 1, 5, 50, 100, 300 и 500 мкм.

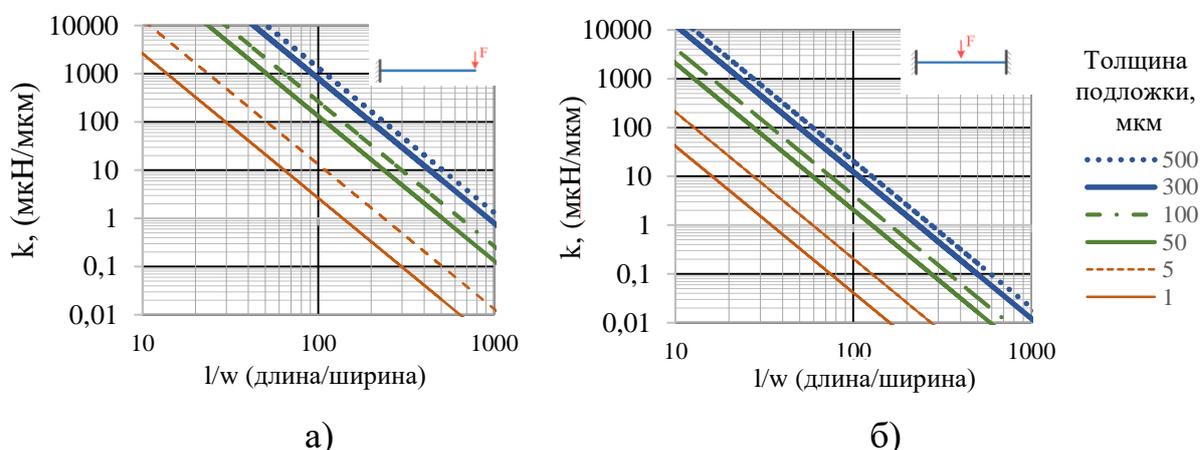


Рис. 7. Расчет и моделирование жесткости упругих балок: а) консольного типа, б) тип заделка-заделка

Исследованы пассивные упругие бистабильные элементы, обладающие двумя устойчивыми положениями (Рис. 8).

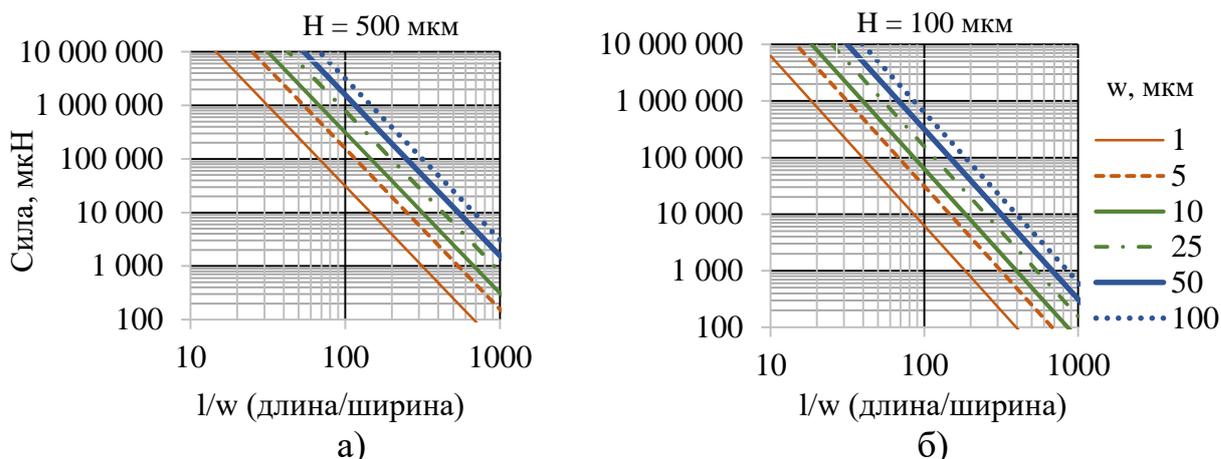


Рис. 8. Расчет силы сопротивления бистабильных элементов при различных толщинах кремниевого слоя: а) 500мкм и б) 100 мкм

На основе математического моделирования данных элементов установлено, что для существования второго устойчивого положения ширина балки должна быть в 4 раза меньше изначального прогиба балки. Ограничивающим фактором при использовании таких элементов может быть величина силы, необходимой для перехода из одного состояния в другое.

При моделировании встречно-штыревого электростатического актуатора для различных подаваемых напряжений было выявлено, что основным параметром, влияющим на электростатическую силу, является аспектное соотношение элементов (Рис. 9). Для получения сил актуации свыше 0,01 мН необходимо получить аспект травления свыше 10 при количестве пальцев свыше 100 и напряжении питания 30 В.

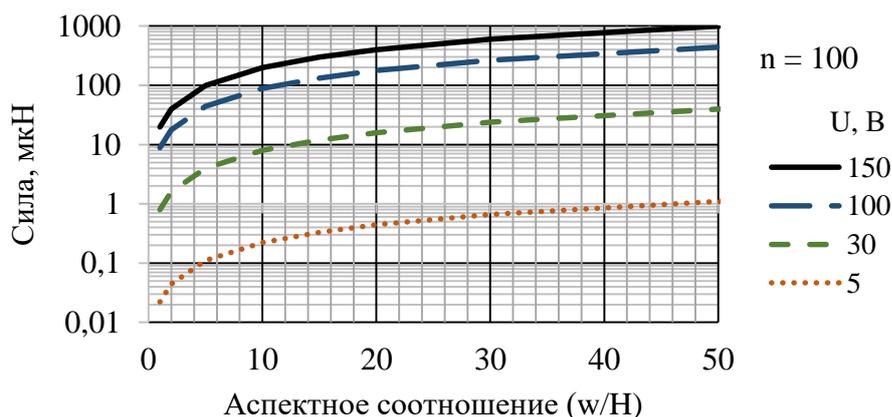


Рис. 9. Расчет встречно-штыревых электростатических актуаторов при количестве пальцев (n) = 100 при различном напряжении питания

На базе шевронного актуатора был спроектирован и оптимизирован по критерию (Рис. 10) максимальных перемещений рычажный механизм усиления перемещений. При выбранном исполнении при нагреве свыше 100 °С расчетное перемещение составило более 100 мкм при усилении сопротивления 2,5 мН.

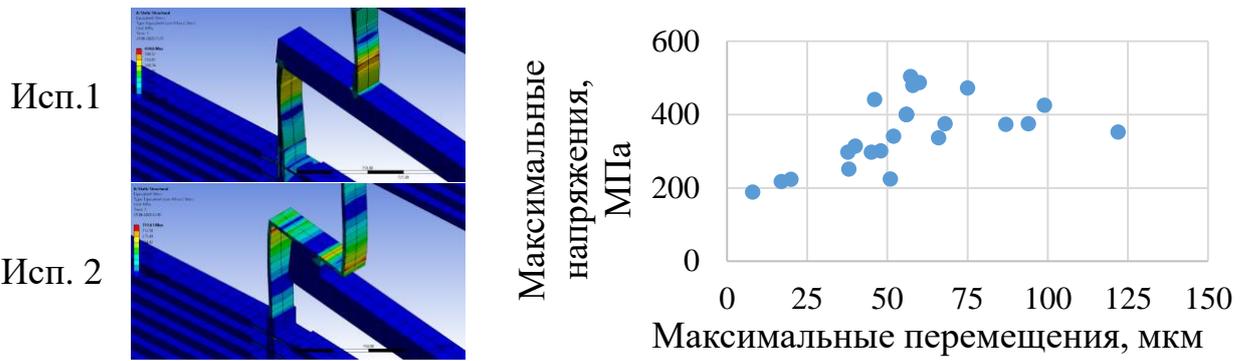


Рис. 10. Результаты моделирования рычажного механизма

Для МЭМС, в отличие от интегральных микросхем, характерна трехмерная структура, требующая при своем формировании многоаспектного профилирования. Для этого преимущественно используются фоторезисты толщиной до 100 мкм. Особенность экспонирования толстых слоев фоторезистов состоит в изменении пространственного изображения интенсивности вглубь резиста (Рис. 11) как при контактном экспонировании, так и при лазерном сканировании. Оптические процессы контактной фотолитографии обычно относят к процессам в ближнем поле, для которых характерны дифракционные явления, описываемые теорией Кирхгофа – Френеля, представленные на рисунке 7. Формула (1) приводит решение дифракционной картины для одиночной линии.

$$I(x_i) = \frac{1}{2} \left[ \left( \int_0^{\xi_2} \cos \frac{\pi t^2}{2} dt - \int_0^{\xi_1} \cos \frac{\pi t^2}{2} dt \right)^2 + \left( \int_0^{\xi_2} \sin \frac{\pi t^2}{2} dt - \int_0^{\xi_1} \sin \frac{\pi t^2}{2} dt \right)^2 \right], \quad (1)$$

где пределы интегрирования:  $\xi_1 = -\sqrt{\frac{n}{\lambda \cdot z}}(w + 2x_i)$ ,  $\xi_2 = \sqrt{\frac{n}{\lambda \cdot z}}(w - 2x_i)$ .

В данной модели интенсивность света рассчитывается как функция, зависящая от длины волны актиничного излучения ( $\lambda$ ), размера окна ( $w$ ) в фотошаблоне, расстояния от фотошаблона ( $z$ ), показателя преломления среды ( $n$ ) и от координаты относительно центра ширины линии ( $x_i$ ).

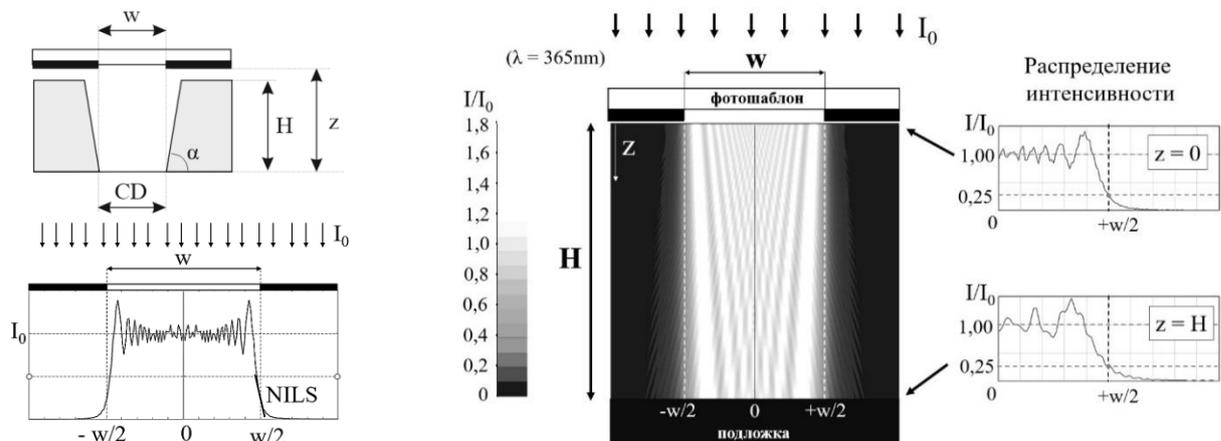


Рис. 11. Пример моделирования фотолитографии толстых слоев

Для выявления закономерностей изменения дифракционной картины по глубине фоторезиста было исследовано более 500 распределений интенсивности для толщин фоторезистов ( $H$ ) от 1 до 100 мкм и ширин окна ( $w$ ) от 1 до 100 мкм.

Используя полученные данные об угле наклона пространственного изображения (NILS) и полученные аппроксимации проведен расчет угла наклона стенок профиля структур в фоторезисте (Рис. 12) на основе порогового моделирования, с учетом оптических свойств фоторезистов.

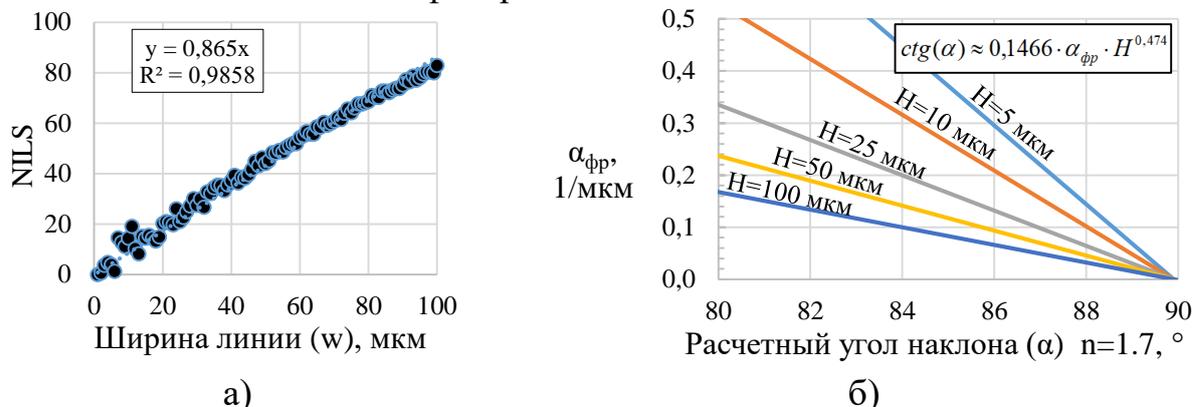


Рис. 12. Результаты моделирования а) NILS при  $H=25$  мкм, и б) зависимости угла наклона стенок толстого слоя фоторезиста от коэффициента поглощения ( $\alpha_{\text{фр}}$ ) и толщины фоторезиста ( $H$ )

**В четвертой главе** представлена экспериментальная апробация синтезированного комплексного МТП изготовления МЭМС. В работе проведена отработка основных технологических операций синтезированного базового МТП и его апробация при изготовлении различных изделий на современной производственной площадке НОЦ «ФМНС» – совместного центра ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Базовый МТП изготовления МЭМС (Рис. 13) содержит в основе две основные группы операций травления: глубокое ионное травление кремниевых подложек с возможностью ступенчатого травления (Рис. 13, а) и глубокое травление стекла (Рис. 13, б) для последующего соединения с кремниевой пластиной. Для этого были разработаны и оптимизированы процессы фотолитографии высокого разрешения (Рис. 13, в), обратной фотолитографии (Рис. 13, г), фотолитографии толстых слоев фоторезистов (Рис. 13, д) и фотополимеров (SU-8) (Рис. 13, е).

Группа операций глубокого ионного травления кремния состоит из формирования маски травления с помощью фотолитографии, травления маски  $\text{SiO}_2$  и глубокого ионного травления кремния. Разработан процесс травления  $\text{SiO}_2$  по всей площади кремниевой пластины диаметром 100 мм до достижения неравномерности скорости травления по площади пластины не хуже  $\pm 5\%$ . При отработке процесса глубокого травления кремния устранен дефект потрива низа элементов (англ. notching), что повышает качество получаемых структур. Достигнута неравномерность процесса травления кремния по площади пластины не хуже  $\pm 3\%$  для структур шириной от 2 до 100 мкм. Процесс травления стекла является сложной технологической задачей, так как основным травителем стекла выступают растворы плавиковой кислоты. Разработан технологический процесс травления, основанный на использовании однослойной тонкой (менее 250 нм) металлической маски, через которую возможно травление стекла со скоростью более 1 мкм/мин по всей площади подложки на глубину до 100 мкм.

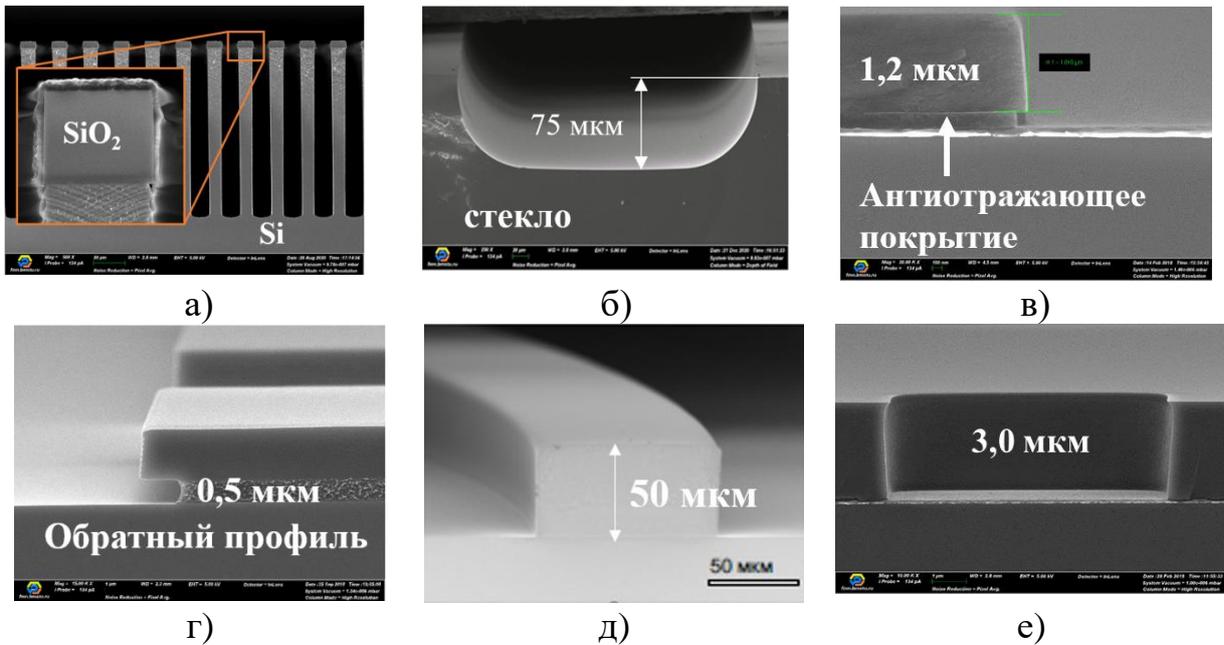


Рис. 13. Результаты отработки ключевых операций базового МТП:  
 а) глубокое ионное плазмохимическое травление кремния,  
 б) глубокое травление стекла, в,г,д,е) фотолитография

В процессе разработки и изготовления термоэлектрического переключателя (Рис. 14, а) экспериментально апробировано наличие бистабильного состояния бистабильных элементов. При изготовлении волоконно-оптического датчика вибрации (Рис. 14, б), конструкция которого предусматривает двухуровневое травление кремния, была разработана группа операций ступенчатого травления кремния для совместного изготовления большой инерциальной массы с пазами для прокладывания оптоволокна с использованием ступенчатой маски из оксида кремния. Ступенчатое травление также успешно апробировано при изготовлении прецизионного микрофлюидного датчика (Рис. 14, в).

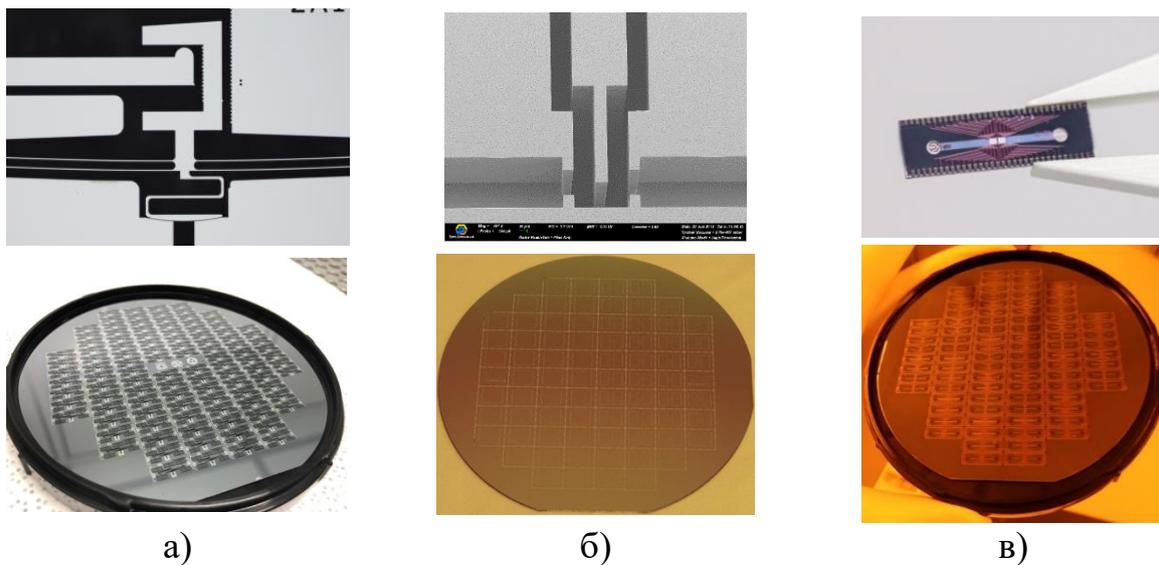


Рис. 14. Апробация базового единого МТП изготовления  
 а) термический переключатель; б) датчик вибрации;  
 в) микрофлюидная «лаборатория-на-чипе»

Был апробирован предлагаемый в работе метод синтеза процессов на основе объединения перспективных классов изделий МЭМС с общими конструктивными элементами для изготовления в едином МТП на основе онтологического структурирования их конструктивно-технологических особенностей и выявления связей между ними. Это позволило повысить эффективность разработки и изготовления изделий МЭМС за счет унификации и стандартизации элементной и технологической базы.

Таким образом, для перспективных изделий МЭМС производится декомпозиция конструкции на элементы, и на основе их схожести производится выделение групп изделий. Разрабатывается базовый МТП, который охватывает возможность изготовления большинства необходимых элементов и позволяет уточнить возможную индивидуализацию процесса для изготовления вспомогательных элементов. Это позволяет провести параллельную разработку и изготовление разнородных изделий.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Обоснована возможность применения онтологического подхода к проблеме конструкторско-технологического обеспечения проектирования и производства изделий МЭМС, предусматривающего рациональный выбор их конструктивно-технологических решений с использованием метода онтологического моделирования технических систем.

2. Предложена методика подготовки производства МЭМС на основе базы знаний с семантическими связями информационных блоков между собой и представлением структуры информационной системы в виде онтологии, что обеспечивает сохранение информации о технологии и конструкции МЭМС в виде семантических триплетов и позволяет не только эффективно сохранить данные, но и генерировать новые знания на основе существующих.

3. На основе построенной конструкторско-технологической онтологии МЭМС выделено 6 групп технологических процессов, охватывающих большинство МЭМС изделий, что позволило предложить вариант комплексного базового маршрута изготовления МЭМС.

4. Разработан и апробирован комплексный МТП изготовления МЭМС на основе обработки стеклянных и кремниевых подложек, предназначенный для целевого класса устройств со схожими конструктивными элементами, среди которых инерциальные сенсоры (акселерометры и гироскопы), оптические и электрические переключатели и микрофлюидные «лаборатории-на-чипе».

5. Применительно к группе однородных по конструктивным элементам изделий МЭМС проведено моделирование упругих балок, бистабильных элементов, встречно-штыревых электростатических элементов и термических актуаторов и даны рекомендации к выбору их геометрических параметров для подложек толщиной от 1 до 500 мкм.

6. Проведено моделирование характерных для трехмерных структур МЭМС процессов формирования многоаспектных микрорельефов контактной фотолитографией. Методами скалярной теории дифракции в ближнем поле на

основе анализа более 500 распределений интенсивности для фоторезистов с толщинами от 1 до 100 мкм и одиночных линий с шириной от 1 до 100 мкм выявлены закономерности изменения дифракционного изображения по глубине толстых фоторезистов. Показано, что угол наклона стенок профиля фоторезиста преимущественно зависит от коэффициента поглощения и от толщины резиста, причем коэффициент поглощения дает наибольший вклад в формирование пространственного изображения в фоторезисте для  $w/z^{0.5} > 1$ .

7. Отработаны операции базового МТП изготовления МЭМС на подложках диаметром 100 мм: фотолитография для слоев фоторезиста с толщинами от 0,5 до 50 мкм с критическим размером до 1 мкм, травление слоев SiO<sub>2</sub> толщиной до 5 мкм с неравномерностью не более 5%, сквозное глубокое ионное травление кремниевых подложек на глубину до 525 мкм с неравномерностью не более 3%, и жидкостное травление стекла на глубину до 100 мкм, со скоростью травления более 1 мкм/мин.

8. Базовый МТП изготовления апробирован при изготовлении трех различных МЭМС устройств.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По материалам и основному содержанию работы опубликовано научных публикаций:

1. Andronic M. M., Rodionov I. A., Tsvetkov Y. B. Digital Design as a Key Approach to Shortening MEMS Development Cycle //ITM Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. Т. 35. 01003 (0,5 п.л./ 0,17 п.л.). DOI: 10.1051/itmconf/20203501003

2. Боброва Ю., Андроник М., Орлов В. Фотолитография и травление в технологиях высокоплотных печатных плат //Электроника: Наука, технология, бизнес. 2020. №. 4. С. 128-137. (0,5 п.л./ 0,17 п.л.)

3. Интегрированный микрофлюидный сенсор потока для лабораторий на чипе и устройств персонифицированной медицины / Андроник М. [и др.] //Биотехнология. 2020. Т. 36. №. 4. С. 112-120. (0,56 п.л./ 0,06 п.л.)

4. Cyclic on-chip bacteria separation and preconcentration / Andronic M. [et. al] //Scientific reports. 2020. Т. 10, №. 1. С. 1-12. (0,75 п.л./ 0,08 п.л.)

5. Colloidal Suspensions in External Rotating Electric Field: Experimental Studies and Prospective Applications in Physics, Material Science, and Biomedicine / Andronic M [et. al] //Saratov Fall Meeting 2017: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIX, 2018. Т. 10716. С. 1071618. (0,5 п.л./ 0,05 п.л.)

6. Боброва, Ю. С., Андроник, М. М. Методы нанесения толстых слоев жидких фотополимеров высокой вязкости //Нано-и микросистемная техника. 2017. Т. 19. №. 4. С. 195-206. (0,69 п.л./ 0,35 п.л.)

7. Низкотемпературное термокомпрессионное сращивание меди в технологии изготовления высокоплотных микросистем / Андроник М. М. [и др.] //Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. №. 6. С. 34-40. (0,44 п.л./ 0,11 п.л.)

8. Фотолитография толстых слоев пленочного фоторезиста в полуаддитивной технологии изготовления плат силовых модулей / Андроник М.М. [и др.] //Наноинженерия. 2015. №. 9. С. 8-12. (0,25 п.л./ 0,07 п.л.)