

На правах рукописи

Баклыков Дмитрий Алексеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ

Специальность 2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и
приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2024

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:

Цветков Юрий Борисович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Тимошенков Сергей Петрович,
доктор технических наук, профессор,
директор Института НМСТ НИУ МИЭТ

Лямин Андрей Николаевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Радиоэлектроника,
телекоммуникации и нанотехнологии»
ФГБОУ ВО «МАИ»

Ведущая организация:

ФГУ «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2024 г. в _____ час. на заседании диссертационного совета 24.2.331.16 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок 8 (499) 263-66-33.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.16
кандидат технических наук



А. Б. Сырицкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Совершенствование микроэлектромеханических систем (МЭМС) продиктовано трендами на создание доступных, функциональных, миниатюрных и сверхчувствительных микроустройств, применяющихся во многих направлениях – от бытовой техники до космических летальных аппаратов. Растущие потребности в расширении областей применения и повышении характеристик изделий микросистемной техники обусловили усложнение их архитектуры, применение материалов с уникальными свойствами, заимствование операций из технологий интегральных схем, развитие специфических МЭМС-технологий. Микро-опто-электро-механические системы (МОЭМС) относятся к числу наиболее перспективных устройств благодаря возможности манипуляции светом на микроуровне, помехозащищенности, компактности, малому потреблению мощности и способности интегрироваться в системы различной сложности – от оптических переключателей до фотонных интегральных схем (ФИС), реализуя синергичный эффект от совместного использования элементов микромеханики и оптики.

Создание высокочувствительных и надежных МОЭМС со сложной архитектурой основано на применении разнородных материалов, обработка которых должна проводиться с суб-микрометровой точностью при получении высокоаспектных структур. Формирование таких элементов, дальнейшее расширение технологических возможностей в широком спектре конструктивных решений на микроуровне реализуется, в первую очередь, за счет совершенствования процессов создания МОЭМС.

Существенное влияние на развитие области МОЭМС оказали научные группы под руководством Хорнбека Л. (Техас Инструментс), Солгаарда О. (Стэнфорд), Хофманна У. (Фраунгофер), Ву М.С. и Хорсли Д.А. (Беркли, Калифорнийский университет), Квака Н. (Федеральная политехническая школа Лозанны), Шолле Ф. (Университет Бургундии Франш-Конте), Хане К. (Университет Тохоку) и Тосиёси Х. (Токийский университет). В России развитие области микросистемной техники происходило при участии Н.А. Дюжева, Тимошенкова С.П. (НИУ МИЭТ), Богословского С.В. (АО «НПП «Радар ммс»), Коновалова С.Ф. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Нестеренко Т.Г. (ФГАОУ ВО НИ ТПУ), Лукичева В.Ф., Орликовского А.А. (ФТИАН) и др. Однако непрерывный рост номенклатуры и усложнение МОЭМС, необходимость повышения их надежности и чувствительности привели не только к развитию методов их проектирования, но и к необходимости применения новых материалов, повышению требований к эффективности технологий изготовления.

Разнородный подход к созданию МОЭМС по всем этим направлениям обусловил многообразие, неполноту и зачастую дублирование информации в условиях ее непрерывного роста, что значительно усложняет и замедляет разработку новых устройств, предусматривая большие временные ресурсы на этапе подготовки производства. Современные экономические реалии требуют более эффективной работы с информацией и поиска в рассматриваемой предметной

области методов, моделей и технических приёмов, обеспечивающих решение этой проблемы.

Поэтому **целью** диссертационной работы является разработка научно-обоснованных физико-технологических методов повышения эффективности создания оптических микроэлектромеханических систем для широкого круга функциональных устройств. Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проведен комплексный конструктивно-технологический анализ и классификация оптических микро- и наносистем, составляющих их элементов, материалов и технологий изготовления.

2. Выделены на базе семантического анализа ключевые элементы и основные классы МОЭМС, которые могут быть изготовлены в едином маршрутном технологическом процессе.

3. Проведено моделирование и конструктивно-технологический анализ МОЭМС, построенных на встречно-штыревых структурах как ключевом базовом элементе.

4. Разработана технология сквозного высокоаспектного травления кремния с вертикальным профилем и отсутствием дефектов на границе с диэлектриком для формирования элементов привода, упругих балок и электрических компонентов с разными типоразмерами в системе кремний-изолятор.

5. Разработана технология создания оптического ввода через толстые слои диоксида кремния, обеспечивающая малые оптические потери за счет вертикального профиля торца волноводной системы и отсутствия зазора с оптоволоком.

6. Проведена экспериментальная апробация разработанных технологий для реализации МОЭМС на встречно-штыревых структурах, а также для создания фотонных интегральных схем.

В ходе выполнения работы определены положения **научной новизны**:

1. На основе конструктивно-технологической классификации разработана онтологическая модель, отличающаяся наличием семантических связей классов МОЭМС и ФИС с точки зрения конструкций изделий, применяемых материалов и возможных технологических процессов, позволяющая учесть их особенности на этапах подготовки производства и в процессе изготовления.

2. Проведено математическое моделирование механических характеристик МОЭМС на встречно-штыревых структурах, позволяющее учесть влияние технологических ограничений изготовления на выходные параметры изделия.

3. Разработана методика оценки характеристик травления узких высокоаспектных кремниевых структур, обеспечивающая контролируемое создание скола без внесения дефектов в исследуемую область.

4. Обоснована и реализована возможность создания торцевого оптического ввода в микросистемы и/или фотонные интегральные схемы методом реактивно-ионного травления с двух сторон обрабатываемой пластины, обеспечивающая вертикальный профиль волноводной системы без зазора с вводимым волокном.

Практическая значимость

На основе разработанных технологий и методов сформирован научно-

технологический базис создания МОЭМС. Разработанные технологические операции использованы при создании сканирующих микрозеркал, инерциальных систем, сверхпроводниковых схем, микрофлюидных и систем «лаборатория-на-чипе», первых российских опытных образцов фотонных интегральных схем с высокими характеристиками (потери на распространение менее 0,3 дБ/см на длине волны 935 нм и 1550 нм, потери на ввод в торец менее 2,0 дБ) в рамках реализации крупнейших российских проектов Фонда перспективных исследований.

Результаты внедрения

Комплексный подход к разработке и изготовлению МОЭМС изделий, технологическая база процессов и модели внедрены при выполнении НИОКР, проводимых МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» (Госкорпорация «Росатом»). Предложенные модели и методика проведения процесса сухого травления использованы в учебном процессе кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

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 изготовлено более 200 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.

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. Конструктивно-технологический анализ на основе онтологического моделирования показал, что ключевые элементы построения более 51% МОЭМС – емкостные встречно-штыревые структуры – имеют наиболее высокие конструктивно-технологические требования, которые могут быть снижены (аспект травления с 20 до 10 и угол профиля с $90^\circ \pm 0,5^\circ$ до $90^\circ \pm 1^\circ$ за счет уменьшения толщины кремниевой пластины на 55%), обеспечивая при этом необходимые характеристики системы (силу, жесткость упругих элементов и диапазон перемещения).

2. Экспериментально определены ключевые взаимосвязанные параметры глубокого реактивно-ионного травления кремния (мощность источников плазмы, рабочее давление, потоки газов, времена этапов, скважность низкочастотного генератора) для формирования каналов аспектом более 20, углом профиля $89,7^\circ \pm 0,3^\circ$, шириной от 2 мкм до 100 мкм и неравномерностью по 100 мм пластине

не хуже 3% с бездефектным травлением на границе с диэлектриком (степень растрова не более 8% от ширины канала) и компенсацией разницы скоростей травления для структур разного аспектного соотношения.

3. Контроль операции глубокого реактивно-ионного травления кремния методами микроскопии с использованием раскалывания с помощью вспомогательных поперечных линий шириной не более 20 мкм без пересечения с тестовыми каналами и концентратором механического напряжения V-образной формы обеспечивает воспроизводимое создание конструктивных элементов шириной менее 5 мкм и аспектом более 10.

4. На основе МЭМС-технологий реализовано создание торцевого оптического ввода в волноводную систему фотонных интегральных схем на базе диоксида и нитрида кремния общей толщиной более 5,5 мкм с углом профиля $90^\circ \pm 1^\circ$ и без зазора с оптоволоком, что обеспечивает средние потери менее 2 дБ на длине волны 935 нм и 1550 нм, за счет применения операций сухого травления толстых диэлектрических слоев и сквозного двухстороннего травления кремниевой пластины.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на российских и международных конференциях: Научно-техническая конференция ФГУП «ВНИИА» (Москва, 2020-2022, 2024), Российский форум «Микроэлектроника» (Сочи, 2022-2023), 4th International Conference on Optics (Греция, Корфу, 2021), а также на научных семинарах кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Москва, 2020-2024.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 9 научных публикациях, из которых 7 – в изданиях Scopus, а также получен 1 патент на изобретение.

Личный вклад. Автор самостоятельно провел поиск и анализ литературы, разработал последовательность структурирования информации по теме диссертации. Провел планирование и экспериментальную апробацию разработанных режимов для изготовления оптических микросистем. Сочетал работу исследователя, технолога, оператора, экспериментатора и конструктора. Отработал процессы сухого травления кремния и диоксида кремния, обеспечивающие равномерность и повторяемость процесса, разработал специальную технологию для создания оптического ввода, руководил выполнением всех операций в рамках разработки конструкторско-технологических основ создания оптических микросистем. 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 171 странице, содержащей 135 рисунков, 23 таблицы и список литературы из 239 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы работы, определены ее цель и задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 проведено литературное исследование конструктивно-технологических решений для создания МОЭМС, а также НОЭМС (нано-опто-электро-механических систем), которые представляют собой гибридные системы фотонных интегральных схем и МЭМС актуаторов, используемых в качестве элемента управления оптической силой связи или для изменения показателя преломления волновода. Установлено, что оптические микросистемы выполняют определенные функции (назначения), согласно которым была проведена классификация (Таблица 1): визуализация, переключение и аттенюация (ослабление) оптического сигнала, сканирование, управление длиной волны излучения или оптическими свойствами системы (фокусное расстояние, глубина фокуса, поле зрения, сила связи, фаза), а также измерение характеристик – ускорение, акустические и механические вибрации, ИК-излучение.

Таблица 1.

Классификация МОЭМС/НОЭМС актуаторов по областям применения

Функция устройства	МОЭМС	НОЭМС
Визуализация	Матрица зеркал	-
	Микро-затворы	
	Интерферометрический дисплей	
Сканирование	Микросканирующие зеркала	Лидар
	Сканирующие решетки	
	Оптическая фазированная решетка	
	Нанопозиционеры	
Переключение и аттенюация оптического сигнала	Оптические переключатели	Переключатель
	Оптические аттенюаторы	
Управление и настройка света (электромагнитной волны)	Настраиваемые лазеры	Настраиваемая решетка
	Профилированная решетка	Фазовращатель
	Решетка с перестраиваемым шагом	Оптические делители
	Поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором	
Настройка оптических характеристик системы (фокуса и апертуры)	Твердотельная настраиваемая линза и апертура	-
	Жидкая линза и апертура	
	Деформируемые зеркала	

Общие конструктивные признаки МОЭМС включают в себя: механические элементы (актуаторы и подвижную раму, способную осуществлять необходимое движение), элементы считывания и управления светом (фотодетекторы, зеркала, линзы, волноводы), а также электрическую развязку. Несмотря на многообразие оптических микросистем, они построены на конструктивно схожих упругих элементах (рамах и балках), которые имеют следующие характерные размеры

балки: высота – от 5 мкм до 50 мкм; ширина – от 1 мкм до 10 мкм; длина – от 100 мкм до 5 мм. К наиболее популярным типам механической конструкции МОЭМС относят прямые и торсионные балки, мембраны, U- и Г-образные балки, а также балки в форме серпантина (Рисунок 1).

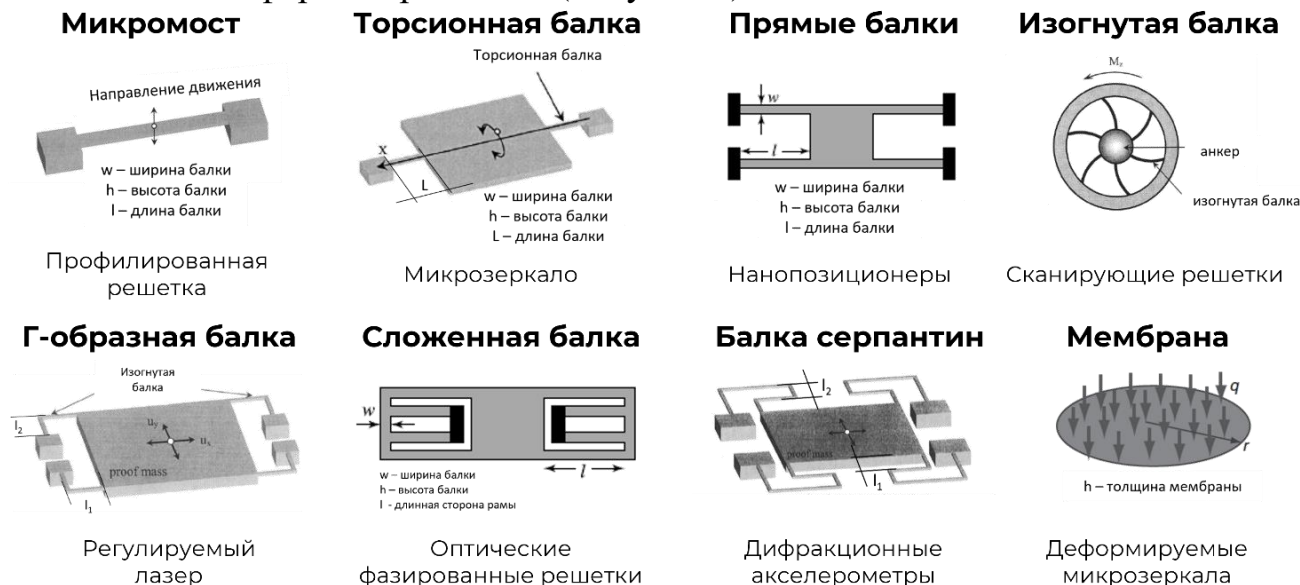


Рисунок 1. Типовые механические конструкции МОЭМС/НОЭМС

Ключевыми элементами оптического воздействия являются зеркала (Al, Au – 200-500 нм), линзы (SiO₂, Si₃N₄, Полидиметилсилоксан (ПДМС)) и решетки (Si, Au, Al). Электрическая развязка устройства осуществляется стеклом или диоксидом кремния (500 нм – 1 мкм), электрические межсоединения и контакты основаны на слоях золота или алюминия (500 нм – 2 мкм), а упаковка осуществляется в оптически прозрачный корпус (стекло или керамика со специальным окном). Наиболее часто в МОЭМС используют электростатический и пьезоэлектрический, реже электромагнитный и термоэлектрический актуатор.

Для создания оптических микросистем необходимо обладать возможностью обработки ключевых материалов: Si, SiO₂, Al, Au и стекла, с характерными размерами от суб-микрометров до миллиметров, обеспечивая при этом низкую шероховатость оптических поверхностей (<1 нм) и создание наиболее ответственных конструктивных узлов в кремнии методом глубокого реактивно-ионного травления с критическим размером менее 5 мкм, высоким аспектным соотношением (более 15), а также вертикальным профилем (90°±1°) и неравномерностью по пластине не хуже 5%. При передаче оптической мощности через оптоволокно на устройство методом торцевого соединения необходимо обеспечивать вертикальность сопрягаемых поверхностей (90°±1°) и точность совмещения (<2 мкм) для минимизации оптических потерь.

Многообразие конструкций, маршрутов изготовления и используемых материалов затрудняет начальные этапы проектирования МОЭМС ввиду необходимости добиваться совместимости конструкции и свойств материалов с используемыми технологиями. Поэтому одним из наиболее важных направлений развития научно-технической базы производства оптических устройств микросистемной техники являются повышение эффективности методов:

технологического анализа изделий; выделения базовых элементов и технологий; сопоставления конструкций изделий, применяемых материалов и доступных технологических решений; обеспечения требуемой чувствительности и надежности; развитие методов хранения и использования конструктивно-технологической базы знаний.

В Главе 2 на основе конструктивно-технологической классификации проведено онтологическое моделирование области МОЭМС и сформирована база знаний с семантической структурой информационных блоков, содержащая онтологические классы изделий (Рисунок 2), включая описание конструкций, применяемых материалов, технологий и операций, а также их свойств. Разработанная онтология обладает функциональной совместимостью и позволяет осуществлять совместное использование систематизированной информации и проводить анализ, устанавливая взаимосвязи, в том числе изначально не заданные, с помощью вычислительных мощностей компьютера.

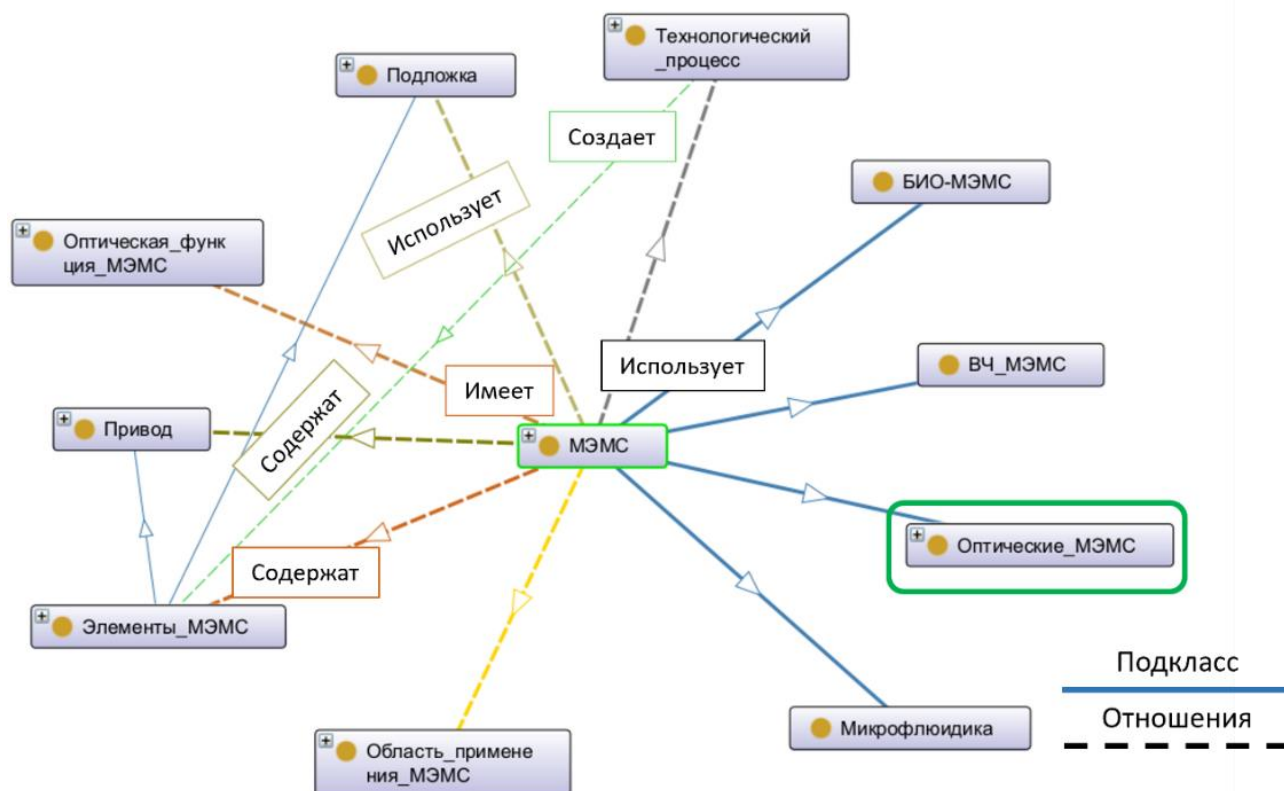


Рисунок 2. Ключевые классы онтологии МОЭМС

Посредством анализа и выделения с помощью онтологического моделирования наиболее ответственных конструктивных элементов с минимальными размерами и наибольшим аспектным соотношением (кратко – аспект) установлено, что ключевым элементом для построения большинства (более 51%) оптических микросистем является электростатический привод на основе емкостных встречно-штыревых структур, широко применяемый также и для других типов МЭМС (Таблица 2). Поэтому возможность создания таких типов устройств по единому маршрутно-технологическому процессу (МТП) позволит изготавливать широкий класс функциональных изделий, используя единую конструктивно-технологическую основу.

Таблица 2.

Ключевые характеристики устройств на встречно-штыревых структурах

Тип	Устройство	Амплитуда (угол), мкм	Высота, мкм	Зазор, мкм	Аспект	Резонансная частота, кГц
МОЭМС	Адаптивная оптика	-	11	2	6	1,3
	Переключатель	34	30	3	10	1,0
	Микрзеркала	(12°)	65	5	13	1-35
	Решетки	27	10	3	3	-
	Фотонные МЭМС	-	0,22	0,15	2	-
	Нанопозиционер	48	25	2-3	8-12	0,1 – 1,0
МЭМС	Фильтры	20	10	2	4-10	25 – 50
	Резонаторы	20	30	1,5	20	1,5-3,5
	ВЧ Переключатель	25	25	2-3	8-12	-
	Биосенсор	100	0,5	5-10	0,1	2,0
	Микроманипулятор	4-40	40	3	13	-
	Акселерометр	0,5	100	7	14	1-2,6
	Гироскоп	0,15	40	1,5	27	5-15

Проведено математическое моделирование устройств на базе горизонтальных и вертикальных емкостных встречно-штыревых структур. Рассмотрены основные типы актуаторов (с зазором и без) для реализации движения оптических микросистем по заданному закону (Рисунок 3).

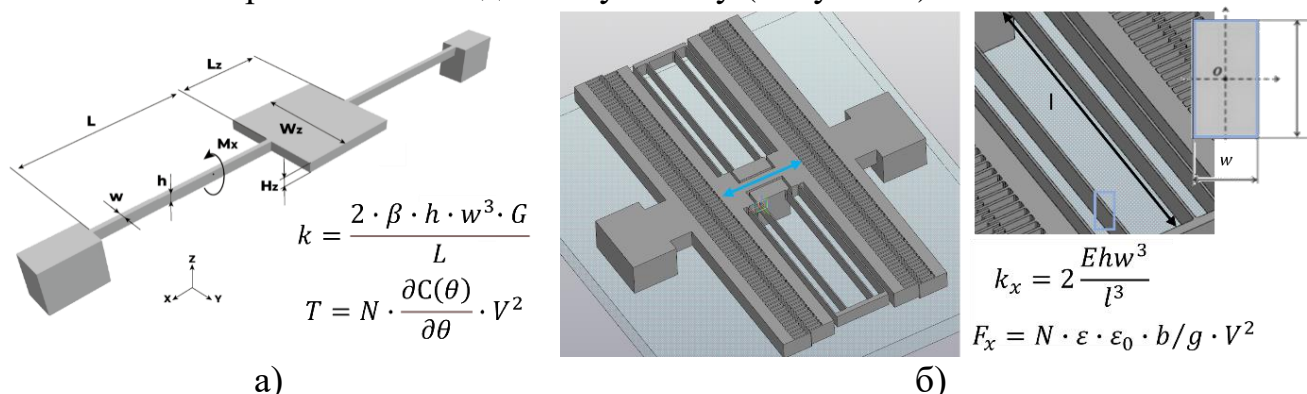


Рисунок 3. Типовые конструкции МОЭМС для реализации: а) кручения; б) продольного движения

Ключевыми механическими характеристиками, определяющими движение, являются тип конструкции и ширина упругих элементов. Чем меньше толщина балок, тем менее жесткой является система, однако следует учитывать риск разрушения тонких упругих элементов, а также то, что изменение исходных размеров более чем на 0,5 мкм (или 10% от исходной ширины) приводит к изменению не только перемещения, но и частотных характеристик (на 15%). Ввиду неучета торцевого взаимодействия разница между аналитическим расчетом и моделированием составляет 15-20% для перемещения и до 5% для резонансной частоты. Посредством уменьшения ширины зазора и увеличения высоты зубьев можно контролировать силу электростатического привода, поэтому важнейшим требованием к технологии является не только точность, но и максимально

достижимое аспектное соотношение. Начальное перекрытие между неподвижными и подвижными зубьями гребенки является одной из характеристик, определяющих электромеханический отклик приводов гребенки. За счет подбора параметров можно увеличить перемещение или скорость отклика.

Предложен маршрутно-технологический процесс на базе технологии кремний-на-стекле, заключающийся в формировании механических кремниевых элементов микросистемы с обеих сторон подложки с возможностью создания ступенчатого профиля (Рисунок 4) через маски фоторезиста или SiO_2 для независимого контроля высоты, ширины и длины упругих элементов и актуаторов (жесткость системы и сила электростатического привода, соответственно). Электрическая развязка обеспечивается посредством использования анодного бондинга боросиликатного стекла.

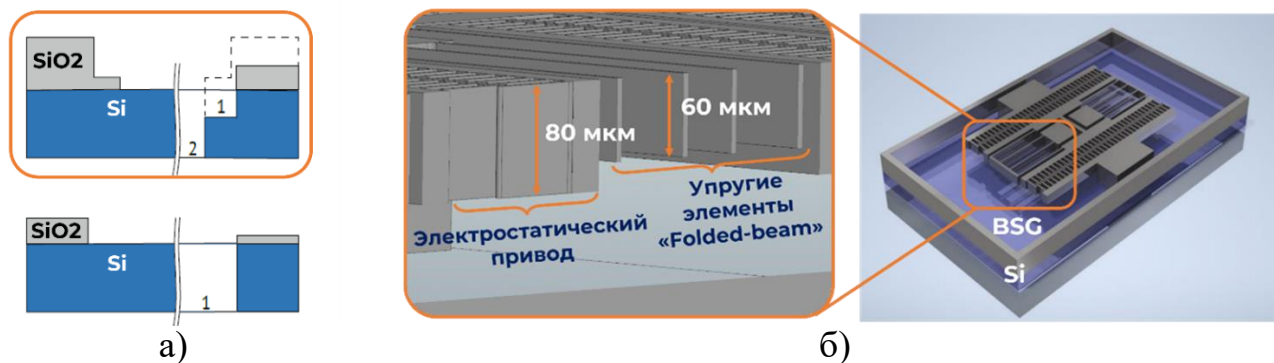


Рисунок 4. Независимый контроль жесткости и силы электростатического привода: а) ступенчатая маска SiO_2 ; б) ступенчатый профиль Si

Возможность интеграции встречно-штыревых структур с критическим размером 2-5 мкм и аспектом 5-20 в базовый технологический маршрут изготовления позволяет создавать различные классы МОЭМС и МЭМС изделий, используя единую конструктивно-технологическую базу (Рисунок 5).



Рисунок 5. Предложенный базовый МТП для создания МЭМС/МОЭМС на встречно-штыревых структурах

Проведена оценка влияния конструктивно-технологических ограничений предложенного МТП на свойства системы и выходные характеристики устройств и установлена взаимосвязь между технологическими ограничениями и параметрами изделия на примере микрозеркала:

$$k = \frac{2 \cdot h \cdot w^3 \cdot G}{3L} = \frac{2 \cdot 0,22H \cdot \left(\frac{0,6H}{3 \cdot AR}\right)^3 \cdot G}{3L} = \frac{0,095 \cdot H^4 \cdot G}{81 \cdot L \cdot AR^3} \quad (1)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{I_x}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{0,019 \cdot H^3 \cdot G}{0,891 \cdot L \cdot AR^3 \cdot \rho \pi r^4}} \quad (2)$$

$$M = N \cdot \frac{\partial C(\theta)}{\partial \theta} \cdot V^2 = N \cdot \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{g} \frac{\partial A(\theta)}{\partial \theta} \cdot V^2 = \frac{W_{об}}{4w} \cdot \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{g} \frac{\partial A(\theta)}{\partial \theta} \cdot V^2, \quad (3)$$

где k – жесткость системы, f_n – резонансная частота, M – момент силы, H – толщина пластины, w – ширина упругой балки, G – Модуль сдвига, L – длина упругой балки, AR – аспектное соотношение, ρ – плотность кремния, r – радиус диска, N – количество пар подвижных гребней, ε – диэлектрическая проницаемость между гребнями, ε_0 – диэлектрическая постоянная, A – площадь пересечения гребней, $W_{об}$ – суммарная ширина области встречно-штыревых элементов с учетом зазоров, g – расстояние между гребнями, а V – управляющее напряжение.

На основе установленных взаимосвязей показано, что за счет уменьшения толщины кремниевой пластины с 350 мкм до 150 мкм можно снижать требования к аспектному соотношению с 20 до 10 и углу профиля с $90^\circ \pm 0,5^\circ$ до $90^\circ \pm 1^\circ$, обеспечивая при этом необходимые характеристики системы, например, угол поворота микрозеркала (Рисунок 6).

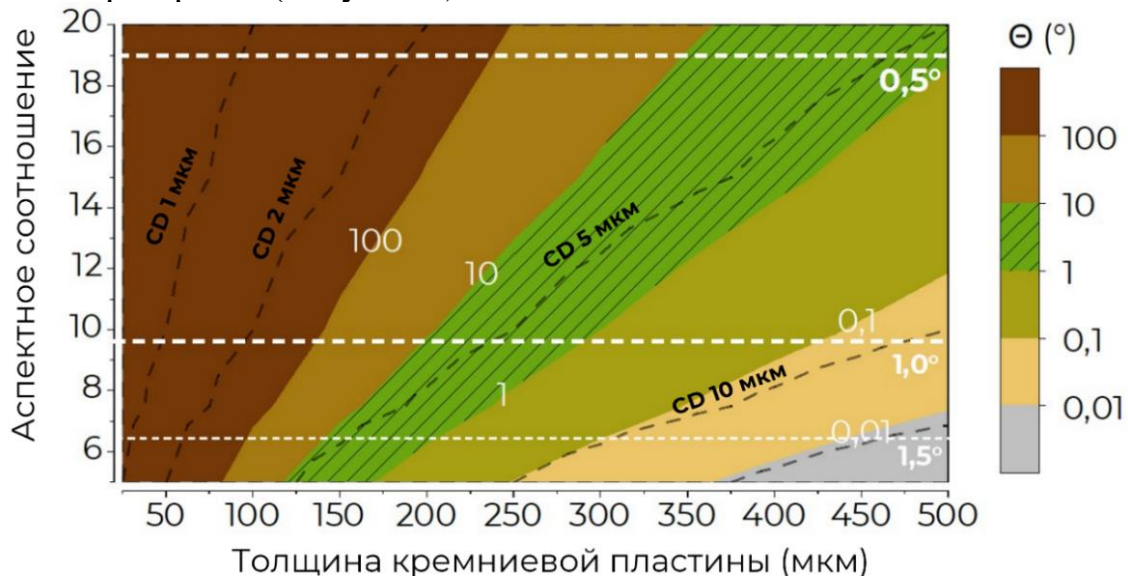


Рисунок 6. Конструктивно-технологический анализ микрозеркала

В Главе 3 проведено комплексное исследование процесса глубокого реактивно-ионного травления кремния (Bosch-процесс) и установлено, что в области пересечения структур при создании каналов может возникать сужение профиля из-за изменения характера подвода и отвода полимеризующей смеси. Чем шире поперечная линия (от 5 мкм до 100 мкм), тем сильнее может сужаться канал (от 10% до 80% от исходной ширины), а характер травления становится менее предсказуемым и сильно зависимым от самой линии скола. При анализе каналов в кремнии после Bosch-процесса особое внимание стоит уделять местам пересечения и изменения формы структуры (Рисунок 7).

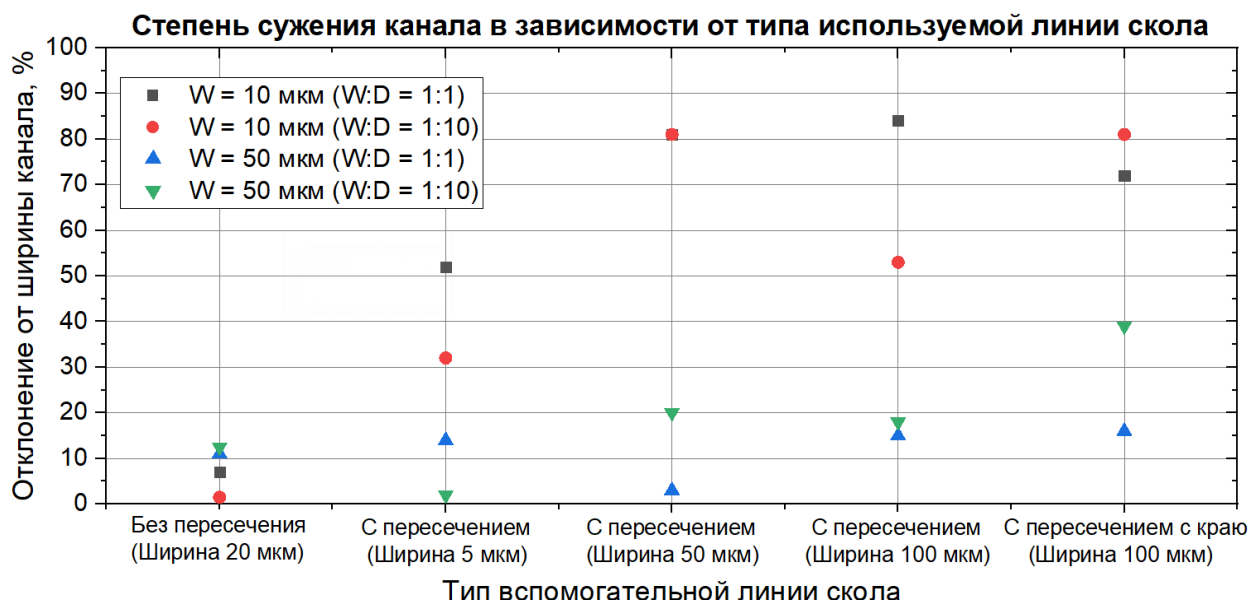


Рисунок 7. Отклонение размера при пересечении вспомогательной линией

Разработан метод контролируемого раскалывания Si (Рисунок 8) с помощью вспомогательных поперечных линий шириной не более 20 мкм, с концентратором напряжения V-образной формы и без пересечения с тестовыми каналами.

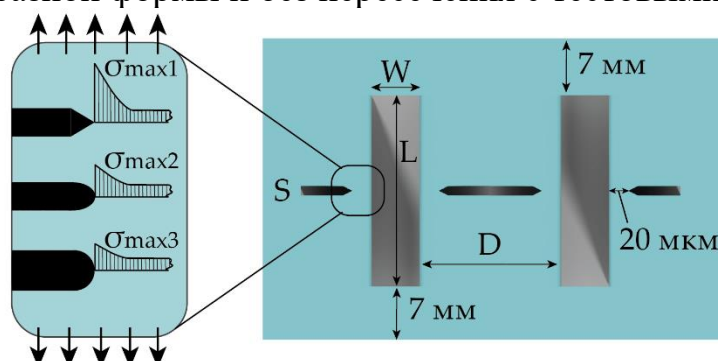


Рисунок 8. Метод контролируемого раскалывания монокристаллического Si

Разработанный метод контролируемого раскалывания предназначен для анализа операции глубокого травления кремния в торец для наиболее ответственных конструктивных элементов шириной менее 5 мкм и аспектом более 10, без разрушения и изменения характера процесса (Рисунок 9).

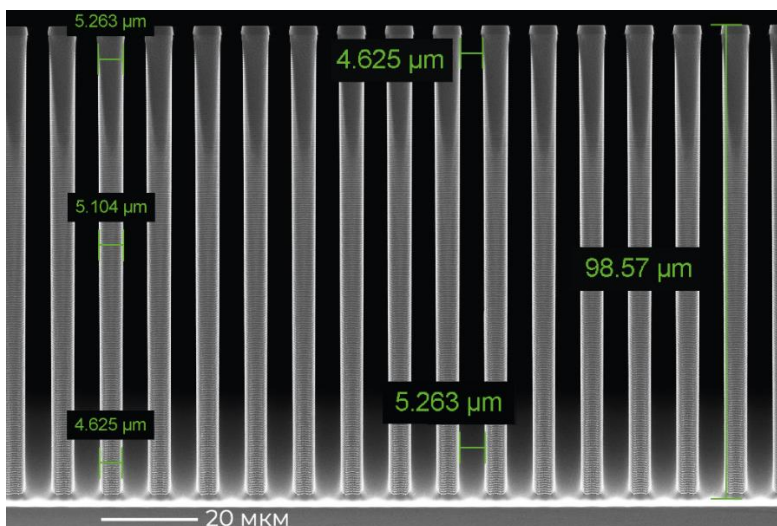


Рисунок 9. Разработанный режим глубокого травления Si

По результатам экспериментальных исследований был разработан режим глубокого реактивно-ионного травления кремния (Рисунок 10), позволяющий обеспечивать для наиболее ответственных конструктивных узлов с минимальным размером от 2 мкм до 5 мкм высокое аспектное соотношение (более 15), угол профиля $89,7^\circ \pm 0,3^\circ$, неравномерность не более 3% по 100 мм пластине и селективность для SiO_2 – 250 (для фоторезиста 75).

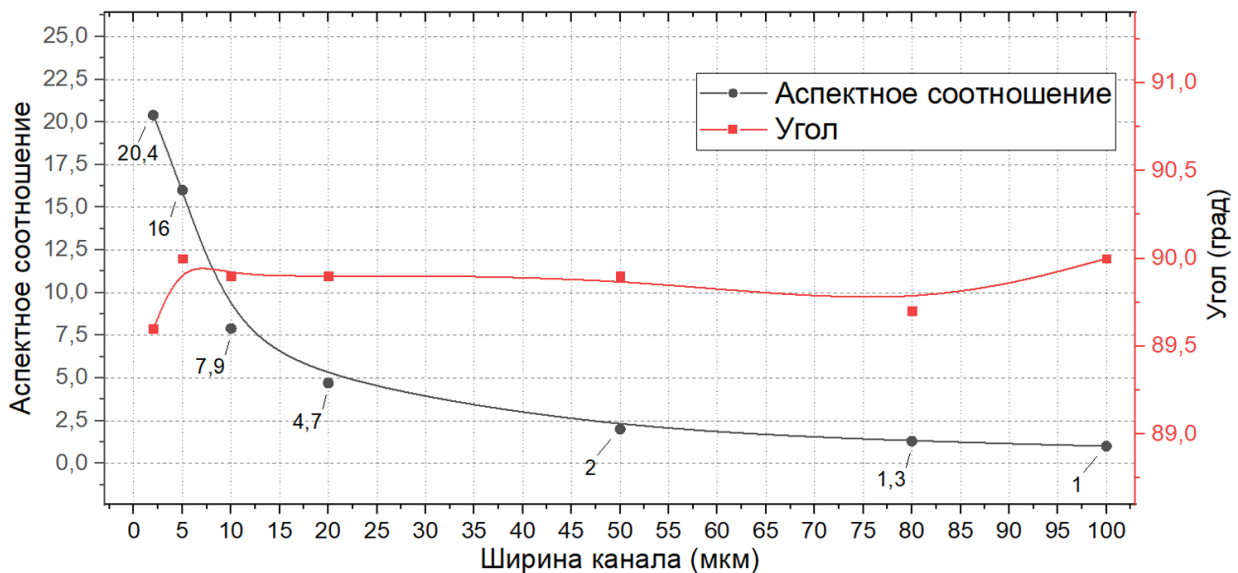


Рисунок 10. Характеристики разработанного режима глубокого травления Si

Низкая дефектность при травлении на границе с диэлектриком с растравом меньше 8% от ширины канала кремния обеспечивается посредством использования низкочастотного генератора в импульсном режиме при 10% скважности (Рисунок 11).

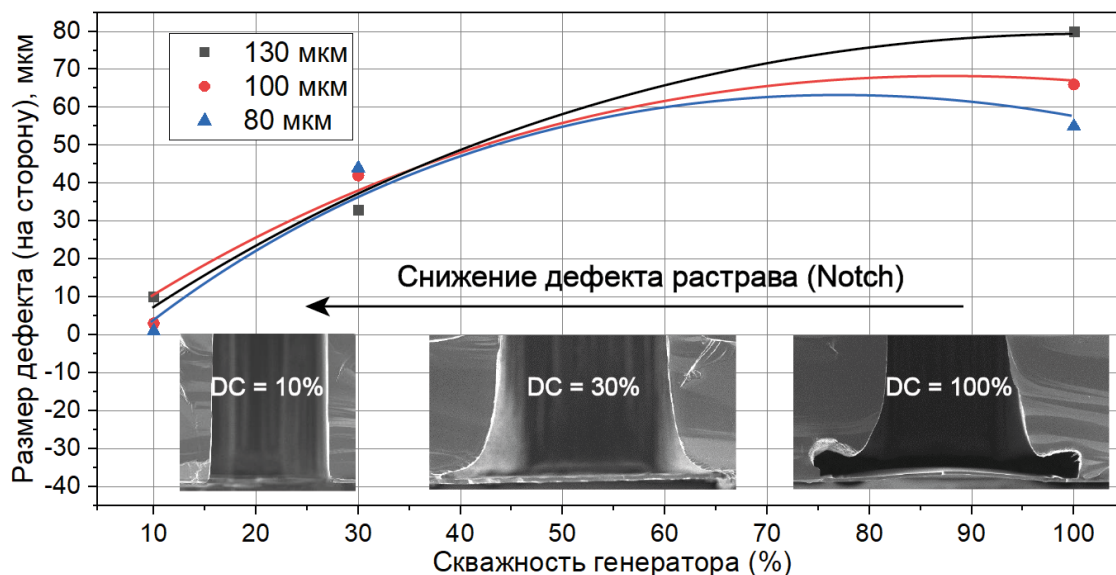


Рисунок 11. Влияние скважности генератора на дефектность травления кремния

При сквозном травлении кремниевой пластины (общей толщиной 525 ± 25 мкм) можно замедлять скорость травления широких каналов (200 мкм, аспект менее 3), компенсируя разницу скоростей по сравнению с более узкими каналами (50 мкм, аспект более 10), при этом процесс травления будет продолжаться. Согласно графику (Рисунок 12), это выражается в более высокой скорости образования дефекта у канала шириной 50 мкм (чёрная линия) по

сравнению с другими линиями (80 мкм, 100 мкм, 130 мкм, 200 мкм). Данный подход применим для формирования структур с разным аспектным соотношением.

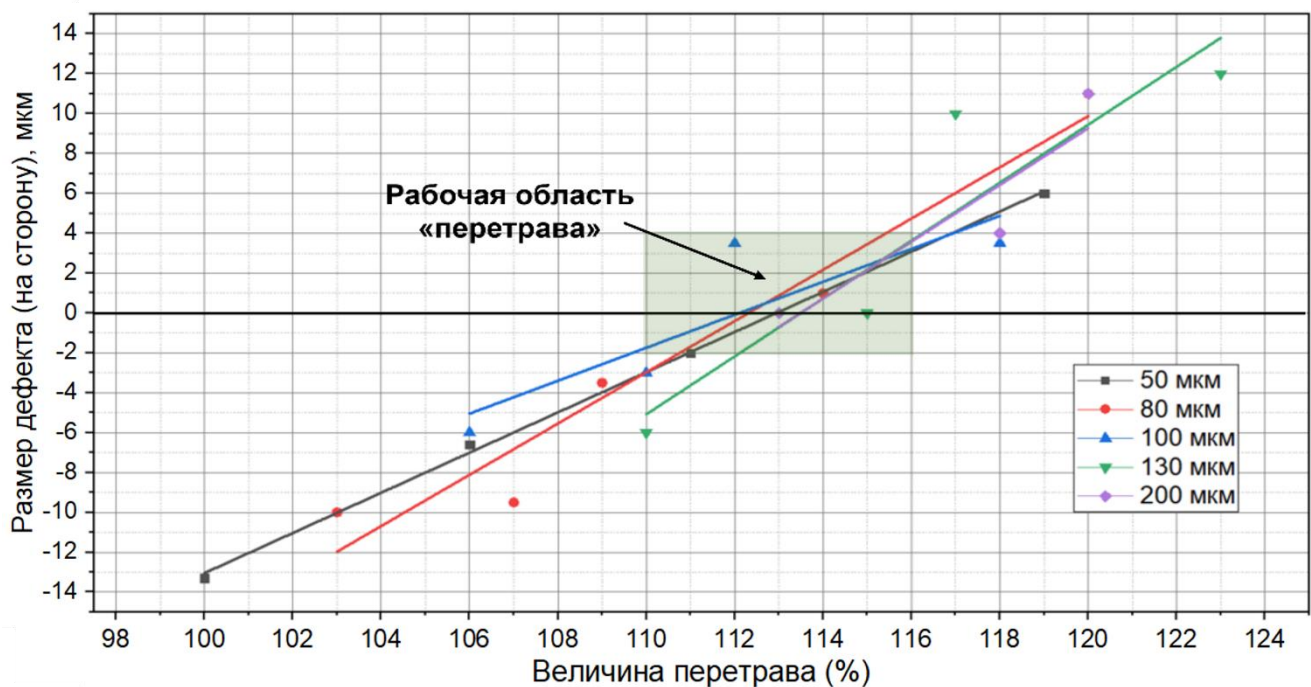


Рисунок 12. Рабочая область перетрава для компенсации скоростей травления кремния (с сохранением низкой дефектности на границе с диэлектриком)

Таким образом, если для сквозных каналов шириной от 50 мкм до 200 мкм установить величину перетрава (процент того, насколько дольше надо травить относительно имеющихся скоростей травления) в диапазоне от 10% до 16%, то можно обеспечить низкую дефектность (менее 4 мкм на сторону) для всех типов структур. Данный подход позволяет более гибко подходить к разрабатываемой топологии и использовать больший разброс размеров, компенсируя разность скоростей за счет увеличения полимерной составляющей Bosch-процесса при приближении ко дну обрабатываемой пластины, где расположен диэлектрический стоп-слой (диоксид кремния).

Проведена апробация разработанных конструктивно-технологических решений для создания устройств на базе встречно-штыревых структур с вертикальной и горизонтальной актуацией (Рисунок 13).

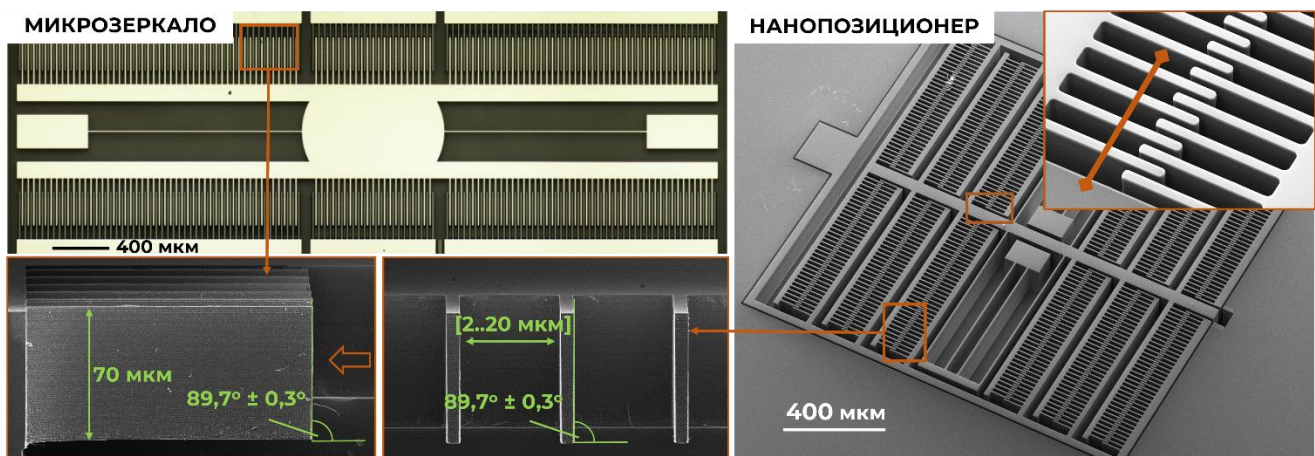


Рисунок 13. Изготовленные МЭМС/МОЭМС на встречно-штыревых структурах

В Главе 4 разработан маршрутно-технологический процесс создания оптического ввода в ФИС и НОЭМС на базе интегральной фотоники для обеспечения малых потерь оптической мощности на ввод путем прямого торцевого соединения без зазора с оптоволоком (Рисунок 14). Данный метод осуществляется посредством разделения пластины на чипы с помощью МЭМС-технологий с последовательным удалением толстых оптических диэлектрических слоев (толщиной более 5,5 мкм) и травлением кремниевой пластины (толщиной более 500 мкм) с обеих сторон, обеспечивая высокие требования к сопрягаемой торцевой оптической поверхности на базе диоксида и нитрида кремния (шероховатость менее 1 нм, вертикальность боковых стенок $90^\circ \pm 1^\circ$).

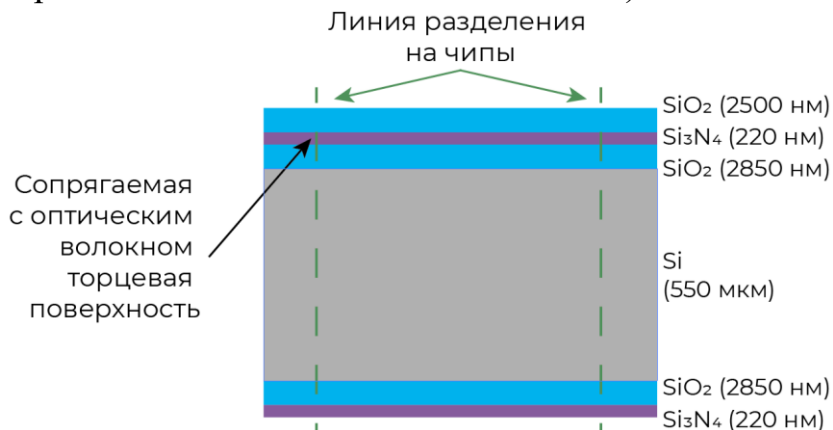


Рисунок 14. Схема создания торцевого оптического ввода для ФИС

Для реализации МТП была разработана технология травления толстых слоев SiO_2 с последующей апробацией при создании оптического ввода в волноводную систему на базе $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ суммарной толщиной 5,5 мкм с неравномерностью не хуже 5%, углом профиля $90^\circ \pm 1^\circ$ и без зазора с волокном (Рисунок 15).

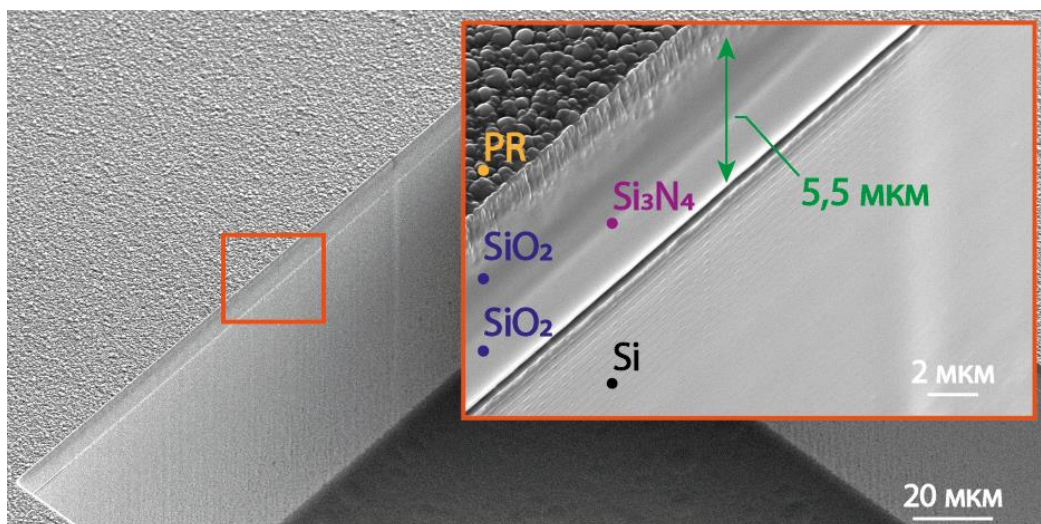


Рисунок 15. Полученная поверхность торца ФИС для оптического ввода

Измерение оптических потерь проводилось по методу «Cut-back», согласно которому оцениваются оптические потери волноводов разной длины. После этого, по полученным точкам построена аппроксимирующая прямая суммарных оптических потерь, где угловой коэффициент равен потерям на распространение, а свободный коэффициент – суммарным потерям на ввод и вывод (все потери измеряются в дБ).

Для характеристики были выбраны 2 лазерных источника с длиной волны 935 нм и 1550 нм. Данная схема (Рисунок 16) позволила измерить внутренние оптические потери и эффективность ввода (оптической связи) по значениям выходной мощности структур различной длины.



Рисунок 16. Схема измерения потерь оптической мощности в ФИС

Полные потери (пропускание) ФИС (Рисунок 17) определяются суммой потерь мощности на ввод и вывод (свободный коэффициент) и распространение (угловой коэффициент), которые можно определить по формуле:

$$IL = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right), \quad (4)$$

где P_{in} – значение входной мощности, P_{out} – значение выходной мощности.

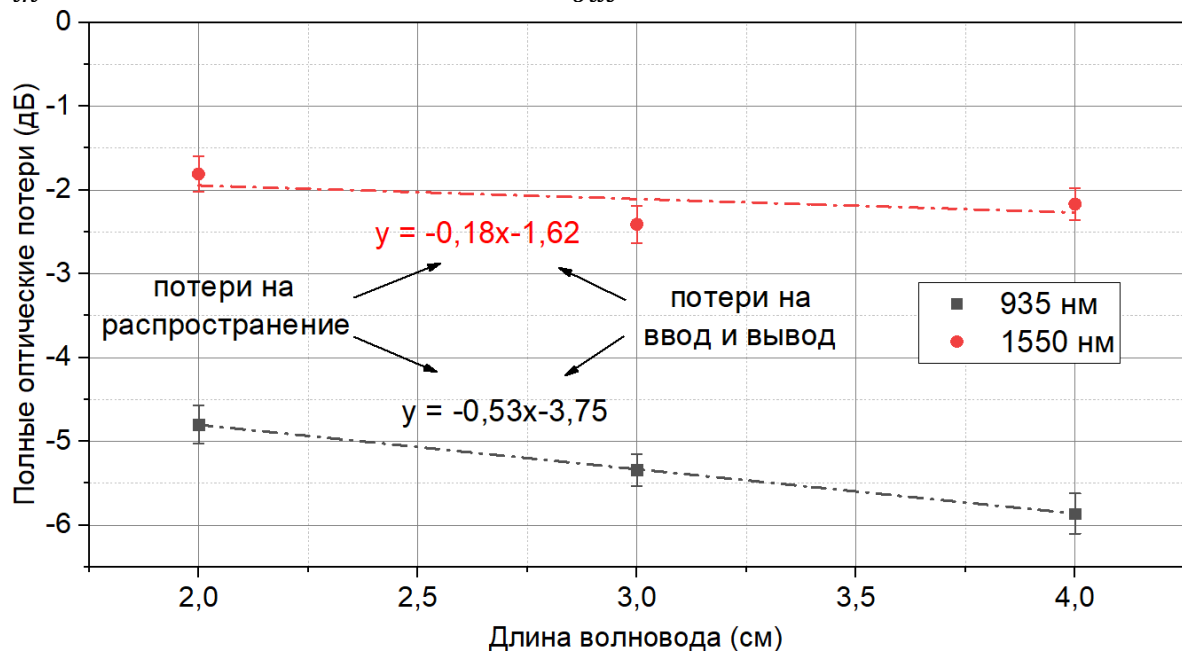


Рисунок 17. Измерение оптических потерь по методу «Cut-back»

Таким образом, на основе разработанных режимов травления кремния и диоксида кремния удалось реализовать предложенный маршрутно-технологический процесс и обеспечить травление $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ суммарной толщиной 5,5 мкм с неравномерностью не хуже 3% по 100 мм пластине, углом профиля $90^\circ \pm 1^\circ$ и без зазора с оптоволоком, обеспечивая средние потери на ввод менее 2 дБ на длине волны 935 нм и менее 1 дБ на длине волны 1550 нм.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании литературного исследования проведена классификация и систематизация оптических микро- и наносистем и установлено, что к основным требованиям их создания относят высокое аспектное соотношение кремниевых каналов (более 15) для обеспечения большей чувствительности (или силы) устройства и низкую шероховатость оптических поверхностей (<1 нм). При передаче оптической мощности через оптоволокно на устройство необходимо обеспечивать вертикальность сопрягаемых поверхностей ($90^\circ \pm 1^\circ$) и точность совмещения (<2 мкм) для минимизации оптических потерь.

2. Метод анализа МОЭМС на основе формирования конструктивно-технологической базы знаний с семантической структурой информационных блоков конструкций и технологий изготовления позволил выделить емкостные встречно-штыревые структуры как ключевой элемент построения большинства оптических микросистем, охватывающий более 51% всех устройств и имеющий наиболее высокие конструктивно-технологические требования к размеру (2-5 мкм), углу профиля ($90^\circ \pm 0,5^\circ$) и аспекту (5-20).

3. Проведено математическое моделирование МОЭМС на базе горизонтальных и вертикальных емкостных встречно-штыревых структур и осуществлена оценка влияния конструктивно-технологических ограничений (толщина подложки, аспектное соотношение, отклонение угла профиля структур от вертикальности и критический размер) на свойства системы и выходные характеристики устройств (максимальное перемещение и резонансные частоты). Показано, что за счет уменьшения толщины кремниевой пластины с 350 мкм до 150 мкм можно снижать требования к аспектному соотношению с 20 до 10 и углу профиля с $90^\circ \pm 0,5^\circ$ до $90^\circ \pm 1^\circ$, обеспечивая при этом необходимые характеристики системы (силу, жесткость упругих элементов и диапазон перемещения).

4. Предложена технология на базе процесса кремний-на-стекле, заключающаяся в формировании механических кремниевых элементов микросистемы с обеих сторон подложки с возможностью создания ступенчатого профиля для независимого контроля высоты, ширины и длины упругих элементов и актуаторов (жесткость системы и сила электростатического привода, соответственно). Электрическая развязка обеспечивается посредством использования анодного бондинга боросиликатного стекла. Показано, что с помощью данного базового технологического процесса возможно создание разных классов МОЭМС и МЭМС на встречно-штыревых структурах с критическим размером 2-5 мкм, аспектом 5-20 и углом профиля $90^\circ \pm 0,5^\circ$, используя единую конструктивно-технологическую базу.

5. Разработана технология глубокого реактивно-ионного травления кремния, которая позволяет формировать каналы аспектом более 20, углом профиля $89,7^\circ \pm 0,3^\circ$, шириной от 2 мкм до 100 мкм и неравномерностью по 100 мм пластине не хуже 3%, а также обеспечивать бездефектное травление на границе с диэлектриком с необходимой степенью растрыва не более 8% от ширины канала и компенсацией разницы скоростей травления каналов разной ширины.

6. Для анализа операции глубокого травления узких (менее 5 мкм) кремниевых высокоаспектных (более 10) каналов разработан метод контролируемого раскалывания подложек без разрушения и изменения характера процесса посредством использования вспомогательных поперечных линий (относительно исследуемых структур) шириной менее 20 мкм, с концентратором напряжения V-образной формы и без пересечения с тестовыми каналами.

7. Разработана и успешно апробирована технология формирования прямого оптического ввода в волноводную систему на базе диоксида и нитрида кремния суммарной толщиной 5,5 мкм с неравномерностью не хуже 3%, углом профиля $90^\circ \pm 1^\circ$ и без зазора с оптоволоконном, обеспечивая средние потери на ввод менее 2 дБ на длине волны 935 нм и менее 1 дБ на длине волны 1550 нм, для создания фотонных интегральных схем.

Работа выполнена в совместном НОЦ «Функциональные Микро/Наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП ВНИИА.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Способ изготовления глубокопрофильных многоуровневых микроструктур в кварцевом стекле: патент № 2804791 РФ / Д.А. Баклыков [и др.]; заявл. 26.05.24; опубл. 05.10.23. Бюлл. №28.
2. Integrated membrane-free thermal flow sensor for silicon-on-glass microfluidics / D. A. Baklykov [et al.] // Lab on a Chip. 2023. V. 23. № 12. P. 2789-2797 (1,46 п.л./0,10 п.л.).
3. Deep multilevel wet etching of fused silica glass microstructures in BOE solution / D. A. Baklykov [et al.] // Scientific Reports. 2023. V. 13. № 1. P. 5228. (1,40 п.л./0,15 п.л.).
4. Low-loss silicon nitride photonic ICs for near-infrared wavelength bandwidth / D. A. Baklykov [et al.] // Optics Express 2023. V. 31. №. 10. P. 16227-16242. (1,91 п.л./0,13 п.л.).
5. Tunable low-loss silicon nitride integrated circuits / D. A. Baklykov [et al.] // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE. 2022. P. 1-1 (0,14 п.л./0,01 п.л.).
6. Self-controlled cleaving method for silicon DRIE process cross-section characterization / D. A. Baklykov [et al.] // Micromachines. 2021. V. 12. №. 5. P. 534. (1,81 п.л./0,50 п.л.).
7. Photoluminescence of two-dimensional plasmonic structures: enhancement, spectral and lifetime peculiarities below the lasing threshold / D. A. Baklykov [et al.] // Optical Materials Express. 2020. V. 10. №. 10. P. 2643-2654. (1,26 п.л./0,20 п.л.).
8. Low-damage reactive ion etching of nanoplasmonic waveguides with ultrathin noble metal films / D. A. Baklykov [et al.] // Applied Sciences. 2019. V. 9. №. 20. P. 4441. (1,81 п.л./0,12 п.л.).