

Инструкция для самостоятельных занятий

Вас приветствует Цифровая интерактивная лаборатория детского технопарка «Смарт-парк» МИЭТ. Представляем интерактивный программный продукт «Микроэлектронные технологии МЭМС», из которого Вы узнаете, как создаются подвижные элементы микроэлектронного изделия в объеме до 100 мкм.

Микроэлектронные технологии за последние пятнадцать лет кардинально изменили возможности связи и мультимедиа.

2005 год



15 лет

2020 год



Пятнадцать лет назад у ваших сверстников были ограниченные возможности коммуникаций, ну разве что позвонить с мобильного или послать смс-ку. Сейчас молодёжь всего мира не представляет, как можно прожить хотя бы один день без смартфона – общение со сверстниками, съемка и обмен фото и видео, доступ в интернет и всё это на цветном экране с прекрасным разрешением, при этом размер гаджета определяет не электроника, а дизайн и эргономика.



Почему электроника стала такой компактной? Как удаётся формировать сложнейшие функциональные устройства в микронных объёмах? Такие возможности предоставлены благодаря нано- и микроэлектронным технологиям.



Мы разберём технологические основы микроэлектроники на примере конструкции и технологии изготовления микроэлектромеханических систем МЭМС.

МЭМС – это обозначение микроэлектронного объёмного устройства с габаритными микромеханического элемента до 100 мкм

Вот как микроэлектромеханические системы описаны в википедии.

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) — устройства, объединяющие в себе [микроэлектронные](#) и микромеханические компоненты.

Механическим компонентом может быть миниатюрное зеркальце — элемент системы сканирования (например, для технологии [DLP](#)) либо примитивный инерциальный датчик, способный определить характерные движения, которые пользователь проделывает со своим устройством.

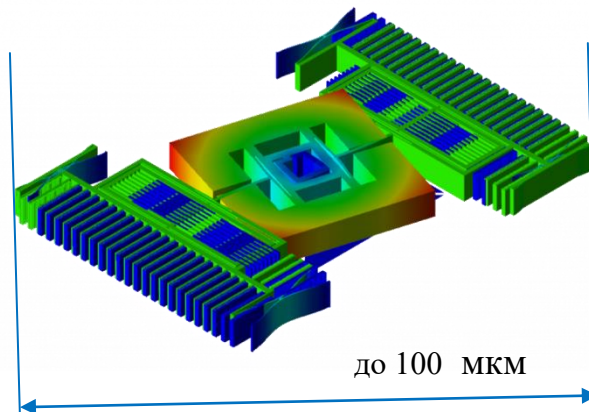
МЭМС-устройства обычно изготавливают на кремниевой подложке с помощью [технологии микрообработки](#), аналогично технологии изготовления однокристалльных интегральных [микросхем](#). Типичные размеры микромеханических элементов лежат в диапазоне от 1 [микрометра](#) до 100 микрометров, тогда как размеры кристалла МЭМС-микросхемы имеют размеры от 20 микрометров до одного миллиметра.

Ссылка на источник [https://ru.wikipedia.org/wiki/Микроэлектромеханические системы](https://ru.wikipedia.org/wiki/Микроэлектромеханические_системы)

Почему МЭМС? С одной стороны это объёмная подвижная конструкция, хотя и в микроисполнении, которая выполняет вполне понятные и полезные функции, с другой стороны технология производства МЭМС содержит типовые микроэлектронные технологические операции и использует набор оборудования, которые в целом применяются для

других микроэлектронных изделий – оперативной памяти и процессоров для современной электроники.

По крайней мере, получив представление о конструкции и технологии изготовления МЭМС, условиях его производства и используемого оборудования, можно считать, что первый шаг к микроэлектронике уже сделан.



Итак, начинаем. Для того, чтобы воспользоваться интерактивным комплексом перейдите по ссылке <https://dt.miet.ru/mems/>

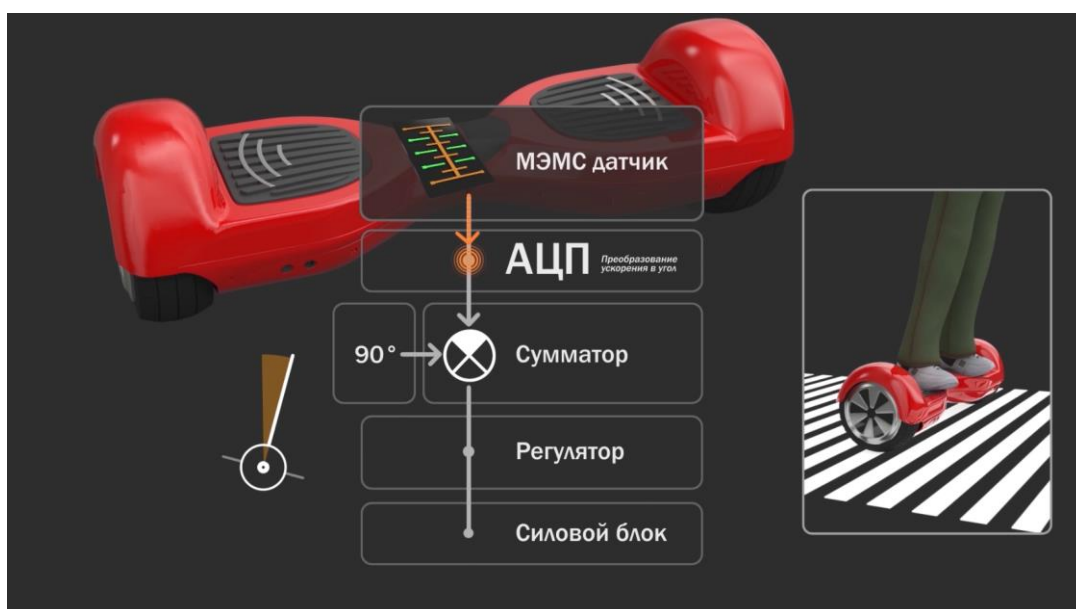


Рекомендуется использовать модули последовательно от первого до пятого по порядку слева направо.

Модуль «Мультимедийное пособие»

Кликните в меню «Мультимедийное пособие» и начните просмотр ролика.

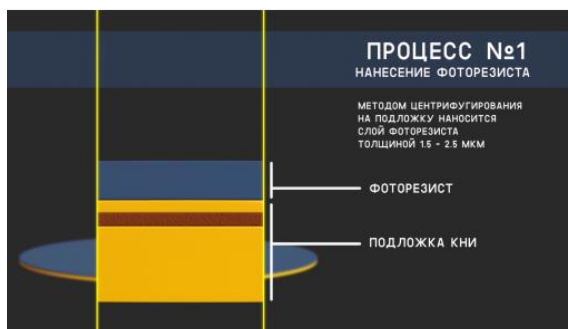
Первый фрагмент «Применение гироскопов на основе МЭМС в гироскутерах» демонстрирует работу системы стабилизации платформы гироскутера. Когда платформа начинает отклоняться от горизонтального положения, МЭМС-гироскоп непрерывно подаёт сигнал на силовой блок колеса пропорционально отклонению, который формирует дополнительный момент на вал колеса для компенсации отклонения. В данном случае МЭМС-гироскоп используется как инерционный датчик положения. Рекомендуем остановиться на анимации мультимедийного пособия со схемой формирования управляющего сигнала компенсации отклонения и внимательно её проработать, чтобы хорошо усвоить роль МЭМС-гироскопа в стабилизационных платформах.



Второй фрагмент мультимедийного пособия «Автомобильные системы» демонстрирует применение гироскопа и акселерометра в автомобилях. Акселерометр – это МЭМС-датчик ускорения. В этом фрагменте наглядно показан принцип работы акселерометра и формирования аналогового управляющего сигнала. Приведён пример срабатывания подушки безопасности при столкновении автомобиля с препятствием. Обратите внимание на то, что размер чувствительного элемента микромеханического элемента МЭМС – 45 мкм, а МЭМС-микросхемы размером несколько миллиметров располагаются на печатных платах автомобильной электроники.



Третий фрагмент мультимедийного пособия «Технологические зоны и процессы» посвящен технологии изготовления МЭМС. Показаны шесть типовых микроэлектронных операций-процессов. Для каждого из процессов сначала демонстрируется анимация преобразований материалов при выполнении технологической операции, а затем технологическая производственная зона, в которой эта операция проводится.



Анимация процесса

Технологическая зона

Обратите внимание на последовательность технологических операций, параметры техпроцессов и применяемое производственное оборудование – всё это Вам потребуется, когда будете самостоятельно формировать технологический процесс производства МЭМС-акселерометра и запускать технологические операции на оборудовании в виртуальной технологической зоне.

Модуль «Интерактив «Конструирование МЭМС»

Для понимания технологических процессов важно хорошо представлять конструкцию устройства, поэтому следующий интерактивный модуль – «Конструирование МЭМС».

Кликните в меню «Интерактив «Конструирование МЭМС» и начните конструирование МЭМС изделий.

Интерактивный модуль содержит цифровой конструктор для пяти МЭМС-устройств: кантилевер, акселерометр, гироскоп, микрозеркало, микроклапан каждый из которых состоит из двух частей, расположенных на расстоянии 5-10 мкм с подключенными электродами. Практически, это обкладки микроконденсатора. Одна из обкладок конденсатора закреплена неподвижно, другая – подвижная, с заранее рассчитанной массой.

МЭМС **кантилевер, акселерометр и гироскоп** представляют собой инерционные емкостные датчики. При ускорении МЭМС-устройства расстояние между подвижной и неподвижной обкладками изменяется, изменяется ёмкость и, соответственно, напряжение между обкладками. Таким способом измеряется ускорение объекта, к которому прикреплён МЭМС-датчик.

МЭМС **микрозеркало и микроклапан** представляют собой исполнительные микроустройства. При увеличении уровня напряжения на электродах возрастает сила притяжения между обкладками конденсатора и подвижная часть микроустройства притягивается к неподвижной. При уменьшении уровня напряжения сила притяжения ослабевает и за счёт упругости подвижная часть отдаляется от неподвижной. Таким образом, изменением уровня подаваемого напряжения управляется положение подвижной части микроустройства.

Сначала надо выбрать устройство. Рекомендуется начинать с наиболее простых устройств по конструкции и далее переходить к более сложным в последовательности: кантилевер, микроклапан, микрозеркало, акселерометр, гироскоп.

Далее рекомендуется выбрать из меню и запустить опцию «Модель». Вам будет полезно увидеть микроустройство в действии в режиме анимации. Здесь можно изложить принцип действия и область применения микроустройства.

На этом этапе и далее при работе с другими опциями меню рекомендуем вращать объёмное изображение изделий для просмотра с разных ракурсов, это повышает уровень восприятия и понимания формы и особенностей конструкции, в том числе частично собранного изделия. Это важно при моделировании технологических процессов в следующих модулях интерактивного комплекса.

Далее рекомендуется выбрать из меню и запустить опцию «Демо-версия». Вам будет полезно увидеть в режиме анимации весь процесс конструирования целиком. Так будет понятен каждый из шагов конструирования и последовательность действий при конструировании. Управляйте демо-версией кнопками «Запустить» и «Пауза».

Далее рекомендуется выбрать из меню и запустить опцию «Проект». Управляйте

процессом сборки. При этом Вы можете останавливаться, задавать вопросы, возвращаться пошагово назад и двигаться пошагово вперёд.

Далее переходим к тестированию полученных Вами знаний и навыков, для чего нужно выбрать из меню и запустить опцию «Собери сам». Вы должны самостоятельно собрать изделие. При возникновении трудностей Вы можете возвращаться к опциям «Модель», «Демоверсия», «Проект» и пробовать самостоятельно собрать изделие заново в опции «Собери сам» до положительного результата.

Для закрепления материала рекомендуется сформировать STL-модель по результатам сборки изделия в режиме «Собери сам». Далее изделие, при наличии технической возможности, распечатывается на 3D-принтере в габаритах 10-20 см. Соберите изделие в той же последовательности, какую Вы освоили виртуально в опции «Собери сам».

Модуль «Интерактив-обучение «Технологии МЭМС»

Модуль «Интерактив-обучение «Технологии МЭМС» предоставляет возможность отработать технологический процесс изготовления МЭМС микроустройств на примере изделия «Акселерометр». В технологический процесс введены шесть основных технологических операций, которые в рамках профориентационной программы в целом дают понимание о сути технологического процесса с допущениями об упрощении реальных технологических процессов на микроэлектронных производствах.

Перед работой в модуле «Интерактив-обучение «Технологии МЭМС» рекомендуем изучить дополнительный материал для понимания технологии в Приложении 1 к данной инструкции.

Перед запуском опции «Интерактив-обучение» рекомендуется просмотреть анимацию последовательного выполнения технологических операций, для этого надо выбрать опцию «Демоверсия» и в том же окне кликнуть команду «Запустить». Для остановки анимации или после её окончания надо кликнуть команду «Сбросить».

Вы имеете возможность просмотреть выполнение технологических операций по шагам в интерактивном режиме для чего надо выбрать опцию «Техпроцесс». Управление переходом к последующей или предыдущей технологической операции осуществляется нажатием кнопок «Вперёд» или «Назад». Анимация технологической операции сопровождается выводом на экран параметров, которые Вам необходимо усвоить для прохождения тестирования в следующем модуле «Интерактив-тестирование «Технология МЭМС».

В интерактивном режиме «Сделай сам» Вы имеете возможность проверить свои знания о последовательности операций. Задайте уровень сложности, затем выберите оп-

цию «Сделай сам», кликните название заготовка «Пластина КНИ», затем выбирайте технологические операции в той же последовательности как в мультимедийном ролике, режимах «Демонстрация» и «Техпроцесс». В случае выбора неверной технологической операции появится сообщение «Ошибка», при этом предоставляется возможность следующей попытки.

Выберите опцию «Обучение». Последовательно запускайте анимации технологических операций: нанесение фоторезиста, экспонирование фоторезиста, удаление фоторезиста, травление верхнего слоя кремния, удаление остатков фоторезиста, травление изолятора. При этом Вы перед запуском очередной технологической операции должны ввести параметры технологических режимов выполнения этой операции.

Введение параметров разбито на четыре уровня сложности. Ниже приведены описания работы по четвёртому уровню сложности.

Сначала необходимо подготовить для ввода параметры технологических режимов и выбора материалов для процессов, источником информации о которых является исключительно мультимедийное пособие первого модуля нашего интерактивного комплекса. При работе на первом уровне Вы используете знания, полученные при просмотре мультимедийного пособия. В случае затруднений Вы можете запустить ещё раз мультимедийное пособие и, в качестве повтора пройденного материала, взять нужный параметр технологического режима или наименования применяемых материалов для ввода параметров текущей технологической операции.

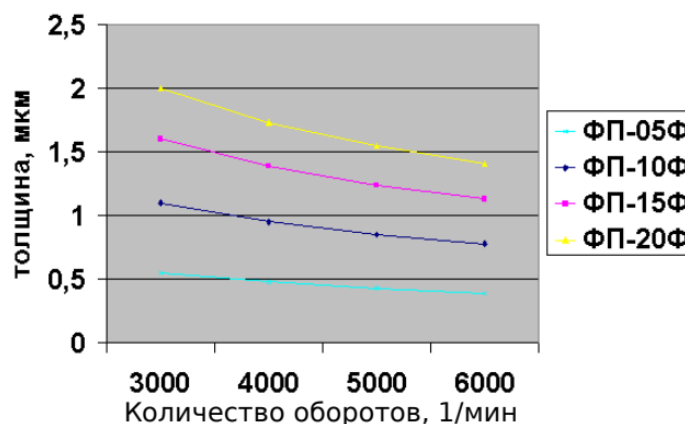
Дополнительно определяются и вводятся параметры по результатам выполнения заданий:

- 1) Для технологической операции «Нанесение фоторезиста» параметры для ввода формируются по результатам выполнения задания:

Определите кинематическую вязкость фоторезиста на пластине КНИ для получения толщины нанесённого слоя фоторезиста 1,5 мкм при заданном количестве оборотов в минуту центрифуги технологической установки нанесения фоторезиста 3000 об/мин. Температура в рабочей камере установки 20°C, температура фоторезиста 20°C, время центрифугирования 40 сек.

На рисунке показана зависимость толщины плёнки от числа оборотов центрифуги и марки фоторезиста. Обозначение ФП-ххФ: ФП-фоторезист позитивный – хх кинематическая вязкость в сСт (мм²/сек) Ф-тип фоторезиста.

Зависимость толщины пленки от числа оборотов



Для выполнения задания рекомендуем воспользоваться дополнительной информацией для понимания, которую вы можете найти в составе методического материала.

- 2) Для технологической операции «Экспонирование фоторезиста» параметры для ввода формируются по результатам выполнения задания:

Для пластины КНИ диаметром 150 мм определите время экспонирования $T = G/W$, где G – номинальная удельная энергия для засветки фоторезиста 70 мДж/см^2 , W – удельная мощность ультрафиолетового излучения, Вт/см^2 . Ответ округлить до целых.

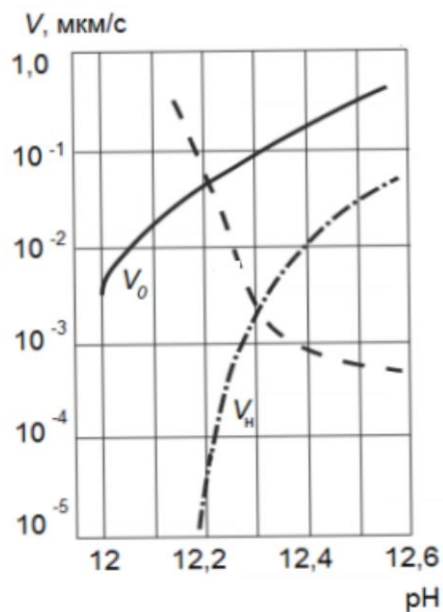
Мощность ультрафиолетового излучения на поверхности пластины $P = 800 \text{ мВт}$. Относительная влажность воздуха в рабочей зоне установки экспонирования 45%.

Для выполнения задания рекомендуем проработать раздел №1 «Технологическая операция «Нанесение фоторезиста» дополнительного материала для понимания технологии в Приложении 1 к данной инструкции.

- 3) Для технологической операции «Проявление фоторезиста» параметры для ввода формируются по результатам выполнения задания:

Определите время удаления фоторезиста при заданной кислотности раствора $\text{pH} = 12,2$ для проявления фоторезиста и толщине нанесённого слоя фоторезиста 1,5 мкм. Температура раствора 45°C . Ответ округлить до целых.

График зависимости скорости удаления фоторезиста от pH . Обозначения: V_0 – засвеченный фоторезист, V_n – незасвеченный фоторезист.

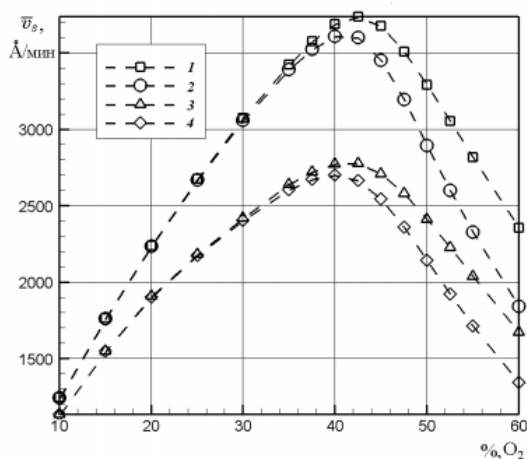


Для выполнения задания рекомендуем проработать раздел №2 «Технологическая операция «Экспонирование фоторезиста» дополнительного материала для понимания технологии в Приложении 1 к данной инструкции.

- 4) Для технологической операции «Реактивное ионное травление кремния» параметры для ввода формируются по результатам выполнения задания:

Определите время травления верхнего слоя кремния в секундах при максимальной скорости травления из приведённых экспериментальных данных на диаграмме. Давление плазмы 0,15 Па. Толщина верхнего слоя кремния 17 мкм.

На рисунке ниже приведен график зависимости скорости травления кремния от концентрации кислорода. Обозначения кривых 1,2,3,4 – степень связывания частиц смеси кислорода и четырёхфтористого углерода с материалом кремния.



Для выполнения задания рекомендуем проработать раздел №4 «Технологическая операция «Реактивное ионное травление кремния» дополнительного материала для понимания технологии в Приложении 1 к данной инструкции.

- 5) Для технологической операции «Удаление остатков фоторезиста» параметры для ввода формируются по результатам выполнения задания:

Для технологической операции удаления остатков фоторезиста в растворе серной кислоты и пероксида водорода (смесь Каро) определите какую массу серной кислоты и какую массу пероксида водорода нужно растворить для получения 900 мл раствора смеси Каро. Соотношение объёмов серной кислоты и пероксида водорода в смеси Каро 2:1. Молярная концентрация растворов обоих компонентов (серной кислоты и пероксида водорода) для приготовления смеси Каро 1,7 моль/литр. Ответ округлить до целых.

Для выполнения задания рекомендуем проработать раздел №5 «Технологическая операция «Удаление остатков фоторезиста» дополнительного материала для понимания технологии в Приложении 1 к данной инструкции.

- 6) Для технологической операции «Изотропное травление изолятора» параметры для ввода формируются по результатам выполнения задания:

Технологическая операция изотропного травления изолятора SiO_2 (двуокиси кремния) производится в установке плазмохимического травления. В рабочей зоне установки давление составляет 10 кПа, температура $+60^\circ\text{C}$. Молярный объём при нормальных условиях (давление 103 кПа, температура 20°C) составляет 22,4 л/моль. Формула реакции травления $\text{SiO}_2 + 4\text{HF} \rightarrow \text{SiF}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Атомная единица массы (а.е.м.) фтора – 19, кремния – 28, кислорода – 16. Абсолютный ноль принять равным -273°C .

Определите объём необходимого фтористого водорода для травления 100 мкг двуокиси кремния в условиях рабочей зоны установки.

Для выполнения задания рекомендуем проработать раздел №6 «Технологическая операция «Изотропное травление изолятора» дополнительного материала для понимания технологии в Приложении 1 к данной инструкции.

При использовании графиков учащиеся будут вводить параметры технологической операции, рассчитанные на основе определяемых по графику значений с погрешностью.

Поэтому здесь и далее в таблицах указан диапазон допустимых значений параметров для ввода при работе с модулем «Интерактив-обучение «Технологии МЭМС».

Параметры для ввода на четвёртом уровне сложности приведены в таблице 4.

Таблица 4. Данные с информацией о параметрах технологических операций и наименованиях применяемых материалов

№ те- хопера- ции	Процесс	Параметр
-	Задания параметров «Структура кремний на изоляторе»	Нижний слой кремния, мкм <i>Ролик, 2:25 *)</i>
		Диоксид кремния, мкм <i>Ролик, 2:25</i>
		Верхний слой кремния, мкм <i>Ролик, 2:25</i>
1	Технологическая операция «Нанесение фоторезиста»	Кол-во оборотов центрифуги, об/мин
		Кинематическая вязкость, сСт
		Толщина слоя фоторезиста, мкм <i>Ролик, 2:43</i>
2	Технологическая операция «Экспонирование фоторезиста»	Удельная энергия для засветки, мДж/см ²
		Тип облучения при экспонировании <i>Ролик, 3:20</i>
		Мощность излучения, мВт
		Время экспонирования, с
3	Технологическая операция «Удаление фоторезиста»	Кислотность раствора, pH
		Скорость удаления, мкм/с
		Время удаления, с
		Тип раствора для удаления фоторезиста <i>Ролик, 4:05</i>
4	Технологическая операция «Реактивное ионное травление кремния»	Концентрация кислорода, %
		Вещество в составе химически активных частиц <i>Ролик, 4:27</i>
		Давление плазмы, Па
		Время травления, с
5	Технологическая операция «Удаление остатков фоторезиста»	Температура обработки, °C
		Время обработки, мин
		Объём серной кислоты, мл
		Объём перекиси водорода, мл
6	Технологическая операция «Изотропное травление изолятора»	Молекулы активного вещества изотропного травления <i>Ролик, 5:54</i>
		Объём фтористого водорода, мл
		Количество стравливаемого изолятора, мкг
		Температура в рабочей зоне, °C

*) ссылка на мультимедийное пособие, мин:сек

Модуль «Интерактив-тестирование «Технологии МЭМС»

Кликните в меню цифровой интерактивной лаборатории «Интерактив-тестирование «Технологии МЭМС» и начните тестировать полученные знания и навыки по моделированию технологических процессов МЭМС изделий.

В модуле «Интерактив-тестирование «Технологии МЭМС» сначала вводим параметры заготовки со структурой «кремний на изоляторе», при этом по окончании успешного ввода данных запускается анимация с визуализацией структуры «кремний на изоляторе», затем учащиеся вводят данные с информацией о параметрах технологических операций и наименованиях применяемых материалов, при этом по окончании успешного ввода данных для текущей технологической операции запускается анимация процесса этой технологической операции.

В случае ошибочного ввода параметров технологической операции появляется сообщение об ошибке и предоставляется следующая попытка. После трёх неудачных попыток система прекращает работу с одновременным выходом из модуля «Модуль «Интерактив-тестирование «Технологии МЭМС»». Для возвращения в режим тестирования модуль необходимо запустить заново.

За выполненные задания назначаются баллы. Максимально на четвёртом уровне можно получить 19 баллов.

Модуль «Интерактив «VR изготовление МЭМС на производстве»

Для запуска модуля «Интерактив «VR-изготовление МЭМС на производстве» кликните на соответствующей кнопке, скачайте исполняемый файл MEMSLab-Setup.exe на персональный компьютер.

Запустите файл MEMSLab-Setup.exe. Выберите диск и папку для установки (рис. 1), следуйте указаниям Мастера Установки.

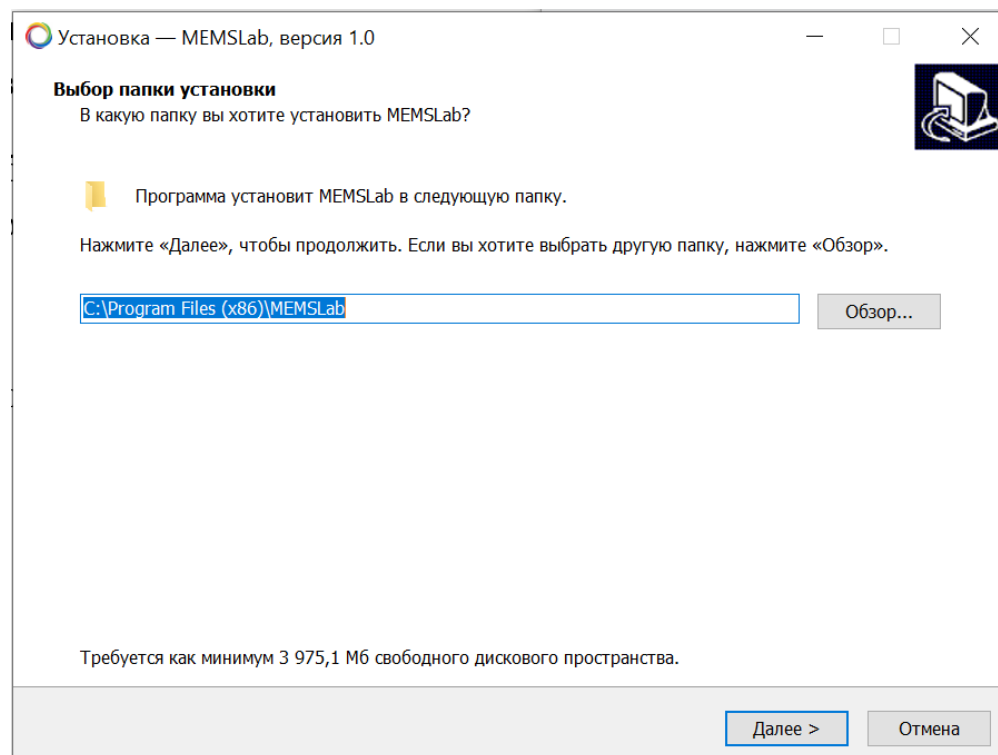


Рис. 1. Диалоговое окно установки

После установки на Рабочем столе Windows появляется Ярлык программы (рис. 2). Запуск программы осуществляется двойным щелчком мыши по ярлыку

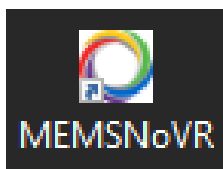


Рис. 2. Ярлык программы

При запуске загружается основное меню программы (рис. 3). При этом есть возможность переключаться между полноэкранным и оконным режимом отображения при помощи сочетания клавиш Alt+Enter.

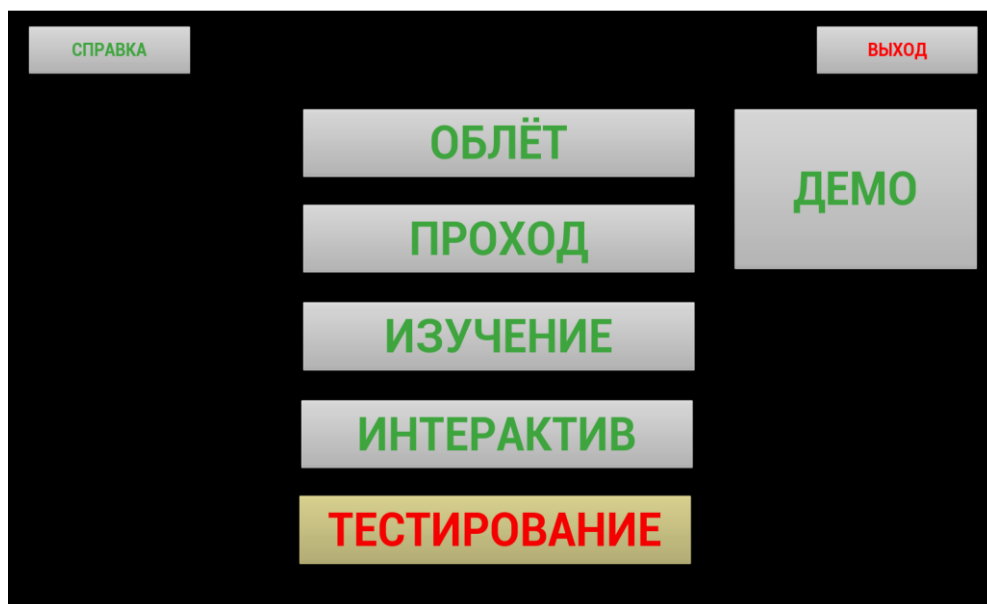


Рис. 3. Основное меню программы

Кнопка Справка – расположена в верхнем левом углу основного меню программы, вызывает окно справочной информации.

Кнопка Выход – расположена в верхнем правом углу основного меню программы, осуществляет выход из программы в Windows.

Кнопка Демо – включает режим демонстрации видеоролика с записанными действиями режимов Интерактив и Тестирование. Этот режим позволяет как просматривать ролик последовательно, так и переходить от фрагмента к фрагменту нажатием соответствующих кнопок. Имеется возможность сделать паузу.

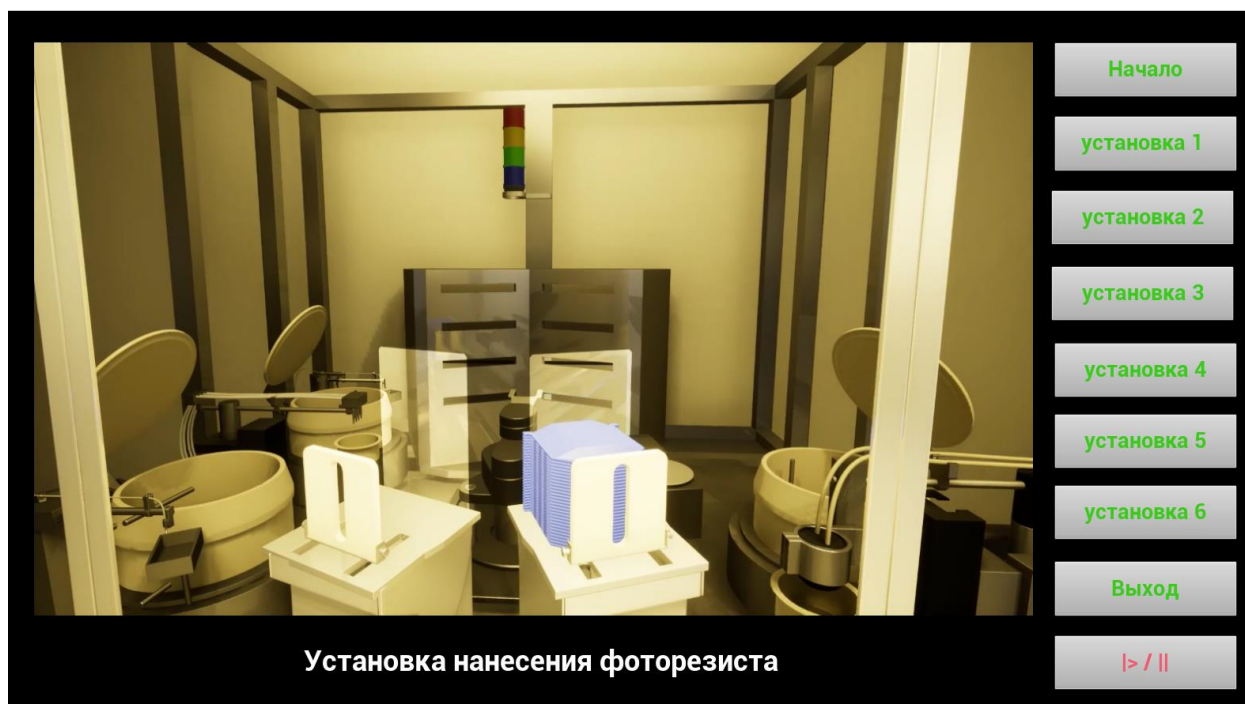


Рис. 4. Вид рабочего экрана в режиме Демо

Кнопка **Облёт** – включает режим самостоятельного ознакомительного последовательного облета производственной зоны. Показано расположение сверху производственных технологических участков с оборудованием. Предоставляется возможность ограниченного интерактива: управление продвижением по маршруту технологических операций от одной установки к другой, на шаг вперед и возвращение по маршруту на шаг назад. Траектория технологического маршрута обозначена маркерными стрелками. Пример рабочего экрана показан на рис. 5.

В режиме **Облёт** управление осуществляется следующим образом:

- клавиши **A**, **Пробел**, левая кнопка мыши – управляют перемещением к следующей технологической установке;
- клавиши **B**, **Backspace**, правая кнопка мыши – управляют перемещением к предыдущей технологической установке;
- мышь управляет поворотом камеры, изменяя направление взгляда;
- клавиша **Esc** загружает меню выхода в основное меню, содержащее два пункта – **Выход** и **Отмена**;
- сочетание клавиш **Ctrl+R** осуществляет перезапуск текущего режима программы.

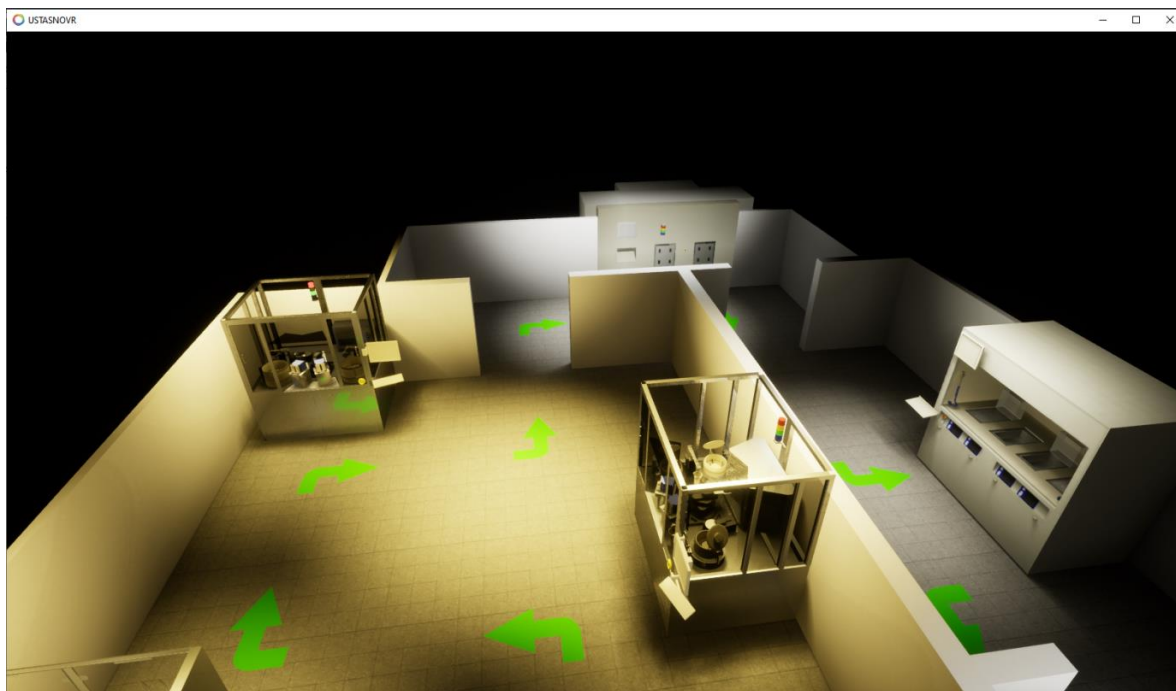


Рис. 5. Вид рабочего экрана в режиме Облёт

Кнопка Проход – включает режим самостоятельного ознакомительного прохода обучающегося в чистых комнатах по произвольному маршруту в режиме с ограниченным интерактивом. Траектория технологического маршрута обозначена маркерными стрелками, указаны названия установок и технологических процессов. В этом режиме осуществляется закрепление знаний о назначении производственных участков и технологического оборудования (рис. 6).



Рис. 6. Вид рабочего экрана в режиме Проход

В режиме Проход управление осуществляется следующим образом:

- клавиши W, Стрелка вверх, клавиша 8 на цифровой клавиатуре (при отключенном режиме NumLock) – управляют перемещением вперед;
- клавиши S, Стрелка вниз, клавиша 2 на цифровой клавиатуре (при отключенном режиме NumLock) – управляют перемещением назад;
- перемещение мыши влево и вправо – осуществляет поворот камеры, изменяя направление взгляда в соответствующем направлении;
- левая или правая кнопка мыши, клавиши Пробел и Enter – воспроизводят действие, если оно разрешено в данный момент. Такая возможность появляется в момент попадания в зону активности. При этом появляется модель руки и воспроизводится анимация;
- клавиши A и D – осуществляют перемещение влево и вправо соответственно;
- клавиши Стрелка влево, 4 на цифровой клавиатуре (при отключенном режиме NumLock) – управляют поворотом налево.
- клавиши Стрелка вправо, 6 на цифровой клавиатуре (при отключенном режиме NumLock) – управляют поворотом направо.
- клавиша Esc загружает меню выхода в основное меню, содержащее два пункта – Выход и Отмена;
- сочетание клавиш Ctrl+R осуществляет перезапуск режима программы.

Для входа в чистые комнаты, необходимо «переодеться» в специальный костюм. Для этого необходимо подойти к стеллажу. При появлении «руки» следует навести ее на оранжевый костюм и нажать левую или правую кнопку мыши (рис. 7).



Рис.7. Вид рабочего экрана в режиме выбора специального костюма

Если костюм исчезнет, значит пользователь успешно «переоделся» и может зайти в производственные помещения. Для чего необходимо нажать на кнопку Вход и дверь откроется (рис. 8).

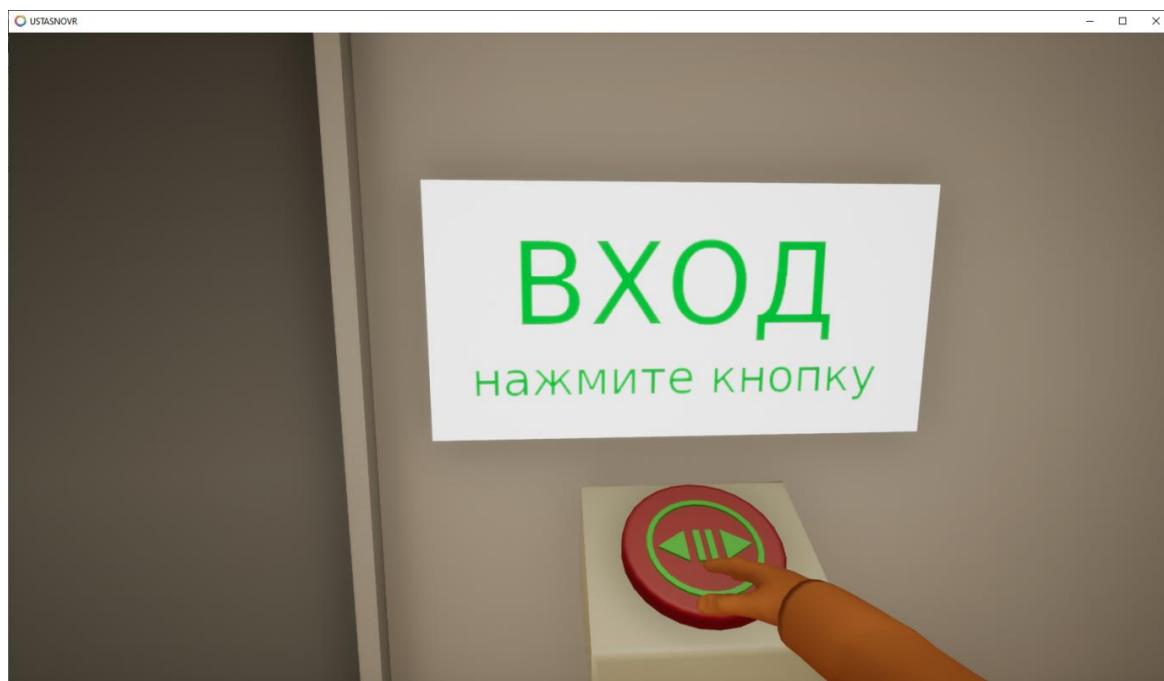


Рис. 8. Вид рабочего экрана Интерактивной VR-лаборатории в режиме Вход

Для выхода необходимо произвести обратную операцию: подойти к пустому стеллажу и «снять» костюм. После этого можно нажать кнопку Выход (рис. 9).

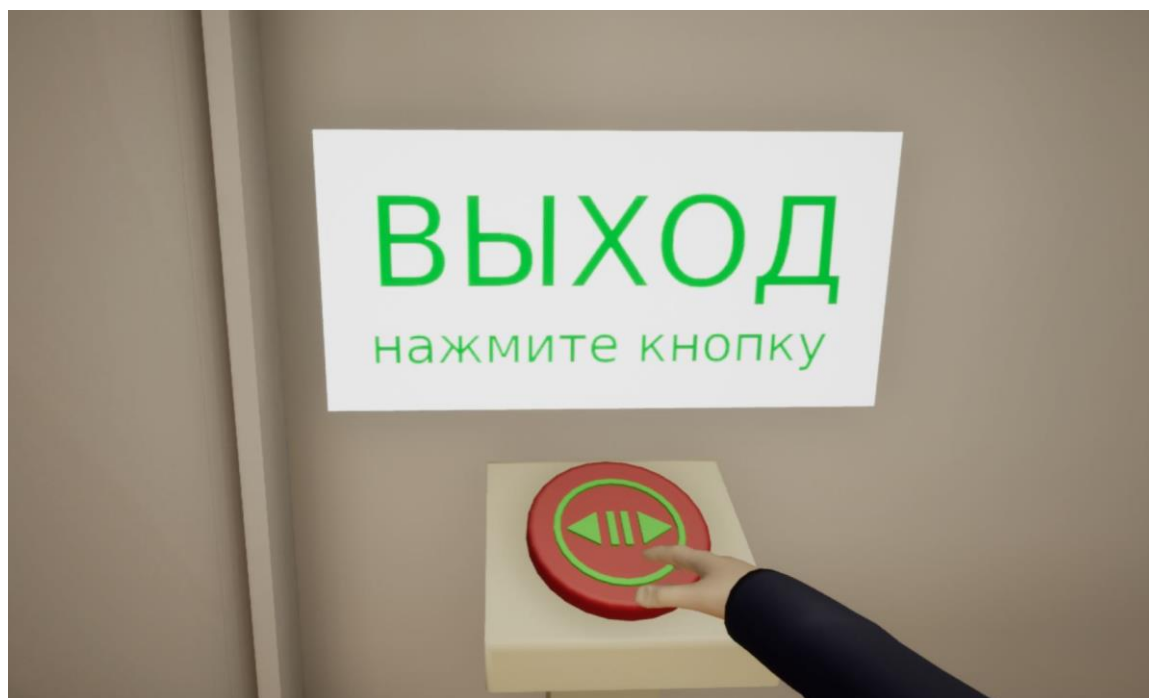


Рис. 9. Вид рабочего экрана в режиме Выход

Кнопка **Изучение** – включает режим самостоятельного прохода обучающегося в чистых комнатах по произвольному маршруту с возможностью просмотра на специальных экранах анимационных роликов о технологических операциях и устройствах. Также технологические установки могут, по команде пользователя, демонстрироваться без корпусов, с детализацией и анимацией основных элементов и операций. Траектория технологического маршрута обозначена маркерными стрелками, указаны названия установок и технологических процессов. В этом режиме осуществляется закрепление знаний о назначении производственных участков и технологического оборудования.

Обход в режиме **Изучение** может осуществляться в произвольном порядке. Управление программой осуществляется аналогично режиму **Обход**.

В момент попадания в зону активности появляется возможность интерактивного нажатия кнопок «рукой». Для этого необходимо щелкнуть левой или правой кнопкой мыши (рис. 10).

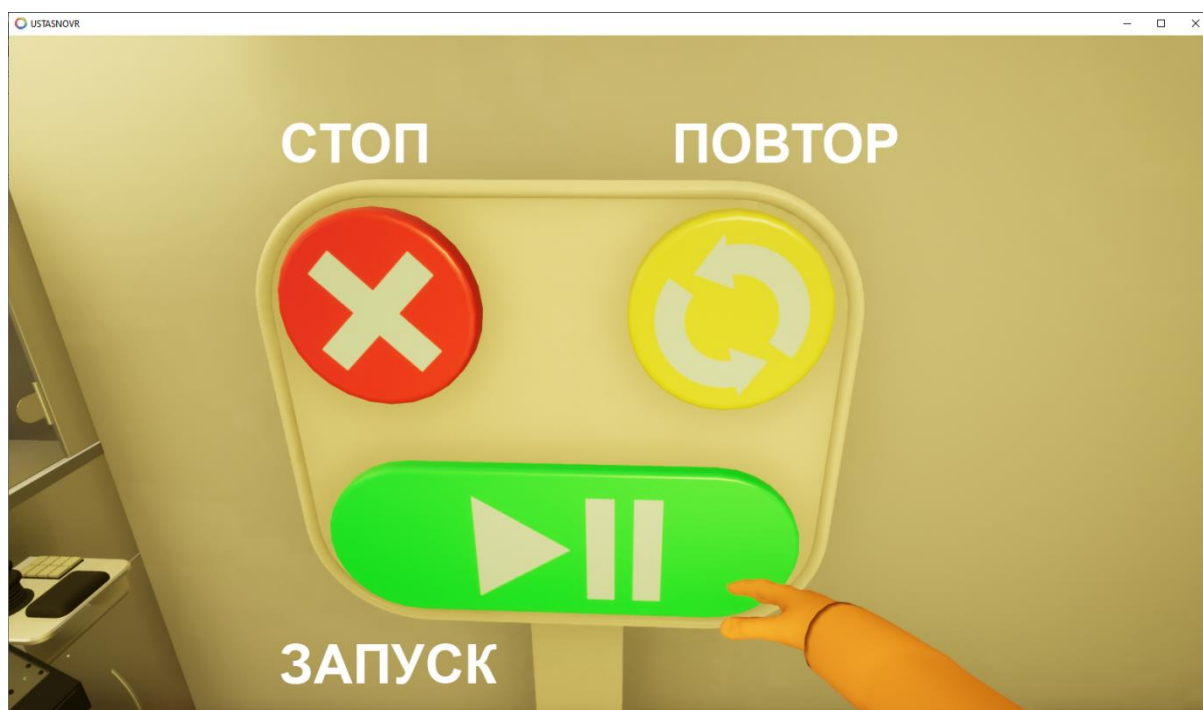


Рис. 10. Интерактивное управление кнопками «рукой»

Кнопка **Запуск** – осуществляет демонстрацию анимационного ролика о технологических операциях и устройствах на специальном экране, а также демонстрацию технологических установок без корпусов с детализацией и анимацией основных элементов и операций (рис. 11). Воспроизведение организовано циклично. Повтор - запускает анимацию сначала.

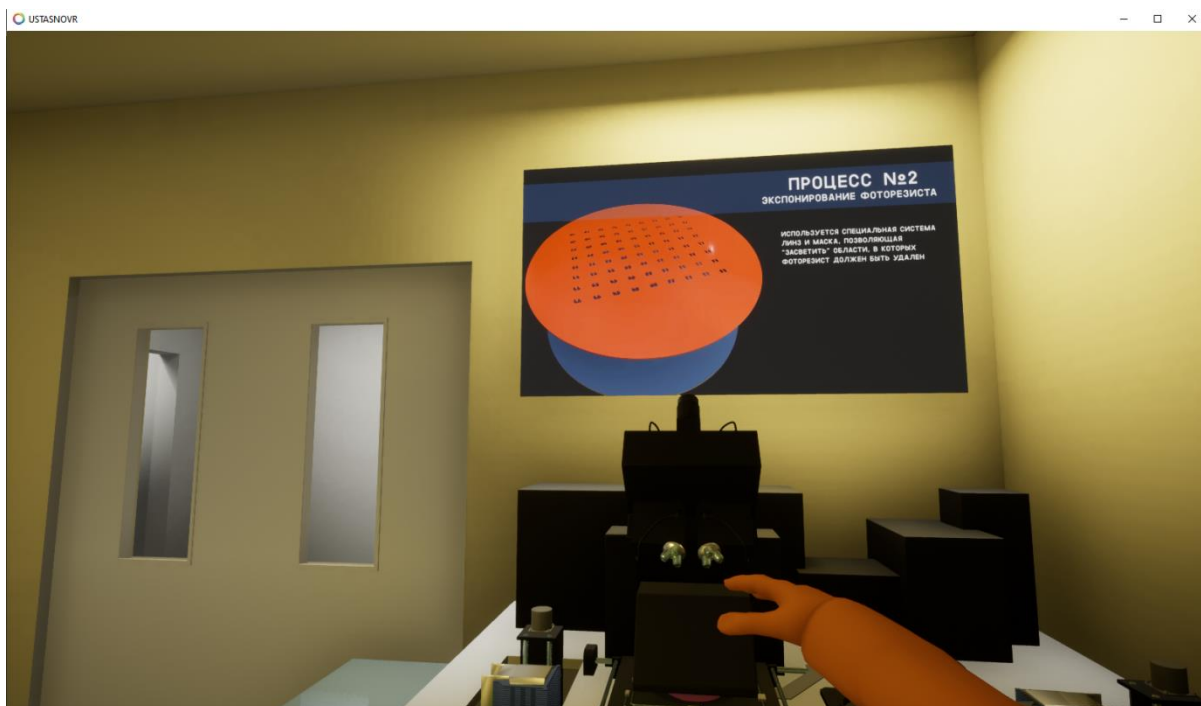


Рис. 11. Демонстрация анимационного ролика и установки без корпуса

Кнопка Стоп – прерывает процесс анимации и переводит установку в исходное состояние.

Кнопка Интерактив – устанавливает режим, в котором добавляется возможность самостоятельной загрузки кассет с пластинами в рабочую зону установки. Обход осуществляется последовательно, кассеты загружаются в необходимые приемные емкости (загрузчики) установок. В данном режиме обучающийся должен продемонстрировать знания последовательности выполнения технологических операций, назначения установок и порядка загрузки кассет: кассеты должны быть перенесены со столика или из предыдущей установки, и установлены в соответствующие рабочие зоны следующих установок в соответствии с порядком технологического процесса (рис. 12).

Управление программой в режиме Интерактив осуществляется аналогично режиму Изучение.



Рис. 12. Загрузка кассет с пластинами в рабочую зону установки

После загрузки кассет в рабочую зону установки, обучающийся должен запустить установку нажатием соответствующей кнопки на стенде. В случае, если все сделано верно – звучит сигнал высокой тональности, загорается зеленый сигнал и установка начинает работу в автоматическом режиме. В случае ошибки – звучит сигнал низкой тональности и загорается красный сигнал (рис. 13). Обучающийся должен понять в чем заключается ошибка и исправить ее. Кассеты не обязательно устанавливать точно, при запуске анимации они автоматически выравниваются.

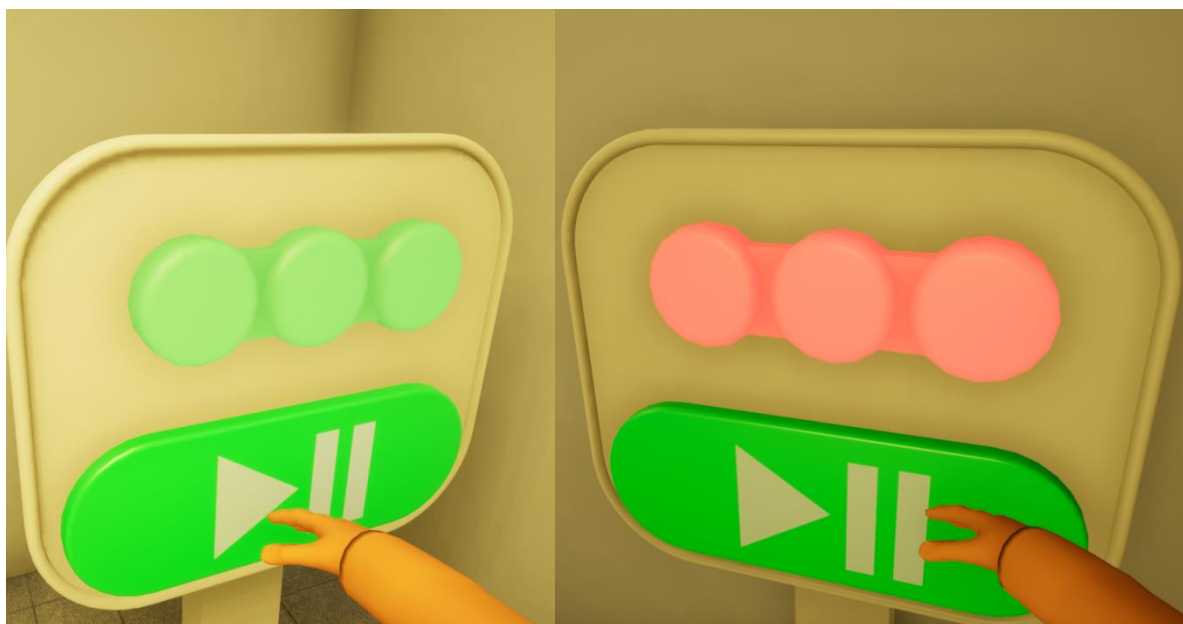


Рис. 13. Запуск технологического процесса на установке

Кнопка Тестирование – устанавливает режим, аналогичный режиму Интерактив. Для тестирования знаний обучающегося в данном режиме добавляется счетчик успешных и неудачных попыток выполнения технологических операций (рис. 14).



Рис. 14. Вид рабочего экрана в режиме Тестирование

Дополнительный материал для понимания технологического процесса

Для понимания технологии рассмотрим технологический процесс производства кантилевера - самого простого по конструкции МЭМС-устройства, с которыми Вы уже познакомились при работе с модулем Интерактив «Конструирование МЭМС». Рекомендуем вернуться в модуль Интерактив «Конструирование МЭМС», выбрать устройство «Кантилевер», запустить демоверсию, включить опцию «Вращение сцены», запустить опцию «Проект» и пройти по шагам сборку конструкции. Это нужно для того, чтобы чётко представлять конструкцию изделия, технология производства которого рассматривается.

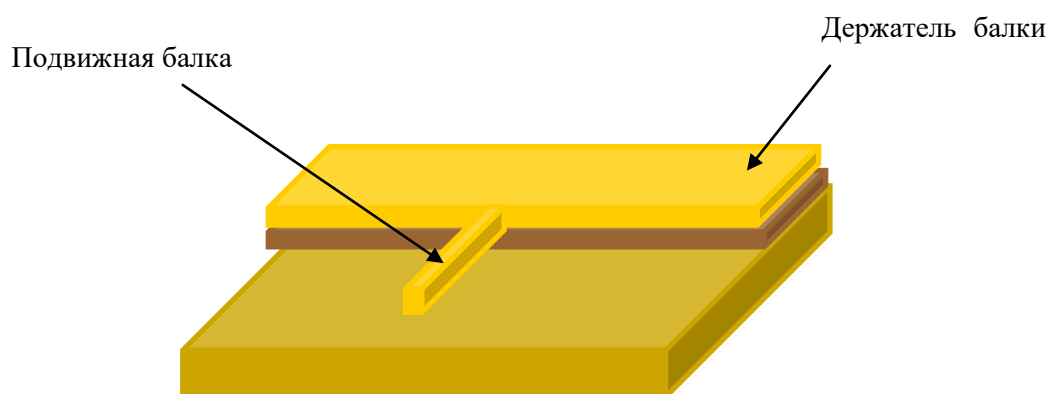


Рис.1. Упрощённая модель конструкции МЭМС-устройства «Кантилевер»

В результате технологического процесса удаляется часть материала верхнего слоя кремния и часть материала изолятора таким образом, чтобы подвижная балка была вывешена над поверхностью нижнего слоя кремния.

Технологический процесс МЭМС-устройства упрощённо состоит из шести технологических операций:

1. «Нанесение фоторезиста»
2. «Экспонирование фоторезиста»
3. «Проявление фоторезиста»
4. «Реактивное ионное травление кремния»
5. «Удаление остатков фоторезиста»
6. «Изотропное травление изолятора»

1. Технологическая операция «Нанесение фоторезиста»

Это первая технологическая операция в техпроцессе изготовления кантилевера. Ожидаемый конечный результат техоперации – слой фоторезиста толщиной 1,5 мкм на

пластине диаметром 15 см со структурой кремний на изоляторе (КНИ).

Для выполнения операции технолог использует роботизированную установку нанесения фоторезиста с компьютерным управлением методом центрифугирования, см. фрагмент мультимедийного пособия от {2:48} до {2:55}. [Предусмотрено использование жидкого фоторезиста.](#)

Вы закладываете в техпроцесс объем фоторезиста исходя из расчётов и знаний о физической природе распределения фоторезиста по поверхности пластины.

Расчёт простой. Объем на пластине КНИ равен произведению площади пластины на толщину слоя фоторезиста. $V=S \cdot h = (\pi D^2/4) \cdot h$ где D – диаметр пластины 15 см., $h=1,5 \text{ мкм} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$. И так $V=(3,14 \cdot 225 /4) \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}=176,6 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \approx 0,0265 \text{ см}^3$.

При этом разработанная технология формирования МЭМС-изделия определяет тип фоторезиста - негативный или позитивный. В нашем случае применяется позитивный фоторезист, то есть засвеченная область фоторезиста в последствии будет удалена, см. мультимедийное пособие [кадр {3:20}](#).

Фоторезист – вязкая жидкость, его кинематическая вязкость находится в пределах 5 – 75 сантиСтокс при температуре 20 °С.

Вязкость жидкости — это ее способность оказывать сопротивление перемещению одних частиц относительно других, то есть противостоять касательным усилиям в потоке. Данный параметр среды нельзя обнаружить в состоянии покоя, он оценивается только во время движения вещества, когда начинают действовать силы сцепления между молекулами.

Примеры значений кинематической вязкости различных жидкостей при температуре 37,8 °С приведены в таблице 1.

Табл.1

Наименование жидкости	Кинематическая вязкость, сантиСтокс
Вода дистиллированная	1,0003
Трансмиссионное масло SAE 90W	14-25
Рыбий жир	32
Оливковое масло	43
Мёд	73
Лак	143
Глицерин 100%	176
Касторовое масло	325

Кинематической вязкостью характеризуются все вещества, которые обладают текучестью. Текучесть — это сдвиг (перемещение) одних частиц по отношению к другим той же самой среды. За счет силы внутреннего трения вязкость противостоит процессу текучести.

Далее технолог использует знания о физической природе распределения фоторезиста по поверхности пластины. Технолог должен понимать, как поведёт себя доза жидкого фоторезиста на поверхности пластины диаметром 15 см, который будет нанесён на пластину КНИ в состоянии покоя капельницей дозатором установки нанесения фоторезиста.

В нашем случае при вращении пластины КНИ в установке нанесения фоторезиста на фоторезист действуют центробежная сила, сила сцепления между частицами и адгезия соприкасающихся с поверхностью пластины частиц фоторезиста.

Разгон ротора установки нанесения фоторезиста нужно запускать сразу после нанесения, чтобы при испарении фоторезиста не изменилась его вязкость. При наборе угловой скорости возрастает центробежная сила, часть жидкого фоторезиста под действием центробежной силы будет сброшена с пластины, а оставшаяся часть с учетом адгезии равномерно распределится по всей площади пластины. В конце концов, при определённой частоте вращения наступит равновесие сил. Число оборотов, при котором наступает равновесие центробежных, когезионных сил сцепления молекул (вязкость) и сил удерживания соприкасающихся с пластиной за счёт адгезии и поверхностного натяжения называется критическим.

При прочих равных условиях, чем больше кинематическая вязкость материала, тем больше должно быть критическое число оборотов вращения пластины.

При дальнейшем увеличении угловой скорости за счёт преобладания центробежной силы равновесие нарушится и начнёт наблюдаться неравномерность слоя фоторезиста с утолщением на краях пластины. Поэтому по достижении критического числа оборотов вращение ротора плавно снижают и затем останавливают. Время центрифугирования с критическим числом оборота ротора установки мало влияет на параметры слоя. Для формирования слоя обычно достаточно 20-30 сек.

По завершении процесса нанесения фоторезиста на пластине остаётся количество (объём) фоторезиста равное расчётному, а именно $0,0265 \text{ см}^3$. Для нормального протекания процесса в дозатор заправляют 2-3 мл фоторезиста.

Обычно в практической работе технолога исходным является марка имеющегося на складе фоторезиста с известной кинематической вязкостью. В этом случае критическое число оборотов вращения пластины определяют из кривых имперических графиков зависимости скорости вращения, толщины слоя фоторезиста и марки фоторезиста.

Если у технолога есть выбор из нескольких марок фоторезиста, то определить марку для применения можно исходя из рекомендуемой скорости вращения ротора установки нанесения фоторезиста.

По достижении критического числа оборотов вращение ротора плавно снижают и затем останавливают. Время центрифугирования с критическим числом оборота ротора установки мало влияет на параметры слоя. Для формирования слоя обычно достаточно 20-30 сек. После остановки ротора с закреплённой пластиной вязкость фоторезиста существенно повышается. Затем роботизированная рука установки нанесения фоторезиста перемещает пластину в зону сушки фоторезиста для придания образовавшейся плёнки. Время сушки пластины КНИ составляет 50-60 сек при температуре $100-110^\circ\text{C}$, после чего пластина возвращается в кассету для извлечения из рабочей зоны установки и перемещения на другую установку для выполнения следующей технологической операции.

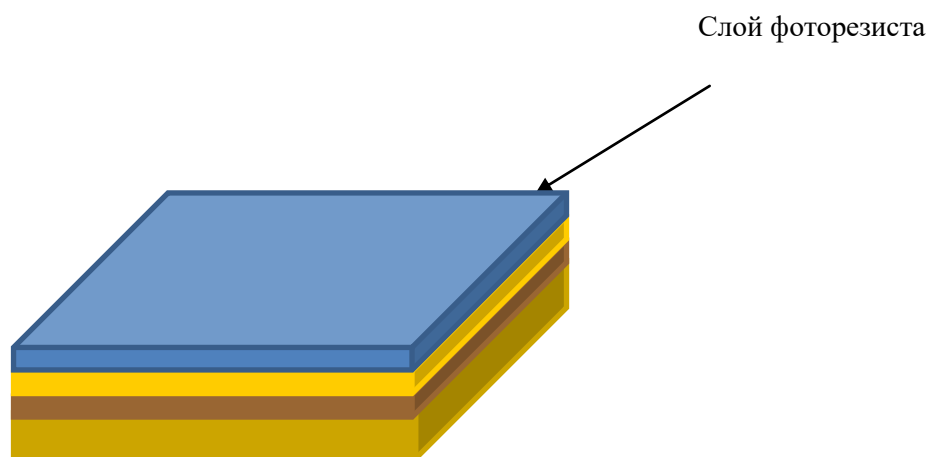


Рис.2. Результат технологической операции «Нанесение фоторезиста»

2. Технологическая операция «Экспонирование фоторезиста»

На второй технологической операции осуществляется экспонирование фоторезиста на пластине диаметром 15 см сразу для нескольких сот одинаковых микроструктур МЭМС-устройства. Процесс наглядно представлен на анимации в мультимедийном пособии, смотрите фрагмент от {2:56} до {3:22}. Здесь Вы переходите из макромира с размерами в десятки сантиметров в микромир с размерами сотни микрометров, то есть масштаб меняется в 1000 раз. При этом наглядно показан переход к одной из сотен микроструктур МЭМС-устройства, формирование которой далее мы и рассматриваем.

Фоторезист – вспомогательный материал, который по результатам выполнения всех операций удаляется, и не будет присутствовать в микроструктуре МЭМС-устройства после его изготовления. Слой фоторезиста используют для того, чтобы делать в нём «окна» для удаления химическим воздействием (далее- травление) части материала кремния или изолятора структуры КНИ.

В первой технооперации «Нанесение фоторезиста» использовался позитивный фоторезист, поэтому по результату проведения технологической операции засвеченный ультрафиолетовым излучением участок МЭМС-структуры изменит свойства и затем будет размыт щелочным раствором в процессе следующей технологической операции «Проявление фоторезиста». Таким образом, образуются «окна» для травления кремния.

Перед технологом при формировании технологического процесса стоит задача определения времени экспонирования при заданной интенсивности излучения и светочувствительности фоторезиста. Аналогом является задание времени выдержки для фотоаппаратов, которыми пользовались до появления цифровых фотокамер и смартфонов.

В позитивных фоторезистах при экспонировании происходит распад молекул полимера и уменьшается их химическая стойкость.

В качестве позитивных фоторезистов используют смеси сульфозэфиров нафтохинондиазидов с фенолформаль-дегидными смолами в органических растворителях.

Светочувствительной основой такого

фоторезиста является сульфозфир нафтохинондиазид, а смола играет роль кислотостойкого полимера. При экспонировании в результате фотохимических реакций фотолиза гидрофобные производные сульфозфира нафтохинондиазида разрушаются и становятся гидрофильными (гидрофильность - характеристика интенсивности молекулярного взаимодействия вещества с водой, способность хорошо впитывать воду, а также высокая смачиваемость поверхностей водой), приобретая способность растворяться в слабых водных растворах щелочей, которые и являются проявителем для позитивных фоторезистов. Такие позитивные фоторезисты чувствительны к ультрафиолетовому излучению в диапазоне длин волн от 250 до 450 нанометров.

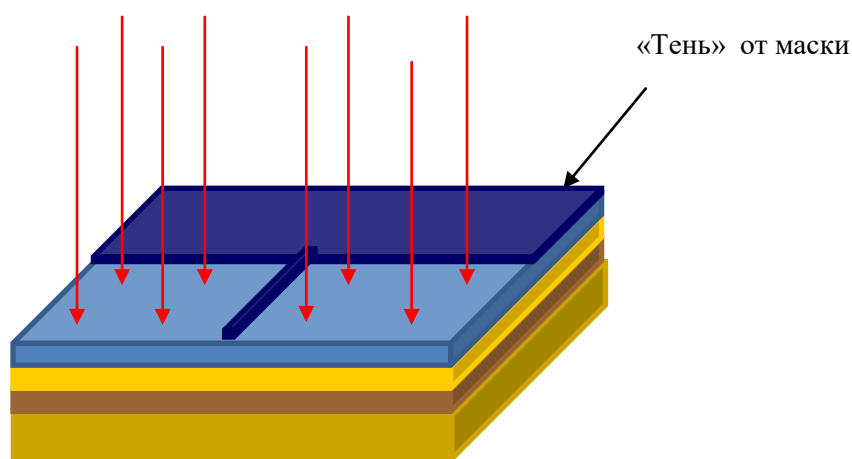


Рис.3. Технологическая операция «Экспонирование фоторезиста»

Время экспонирования необходимо рассчитать. Для расчётов используется параметр используемого фоторезиста - удельная энергии экспонирования. Этот параметр характеризует дозу энергии и точно описывает общее накопленное воздействие УФ-излучения на материал, то есть в нашем случае сколько нужно энергии ультрафиолетового излучения для полного преобразования материала при заданной толщине фоторезиста. Значение параметра берётся из справочников.

3. Технологическая операция «Проявление фоторезиста»

Это технологическая операция, в результате которой засвеченный участок фоторезиста удаляется для того, чтобы открыть «окна» для травления верхнего слоя кремния.

Термин «Проявление», на первый взгляд не соответствует физическому процессу технологической операции – засвеченный фоторезист растворяется и смывается в бурлящем потоке щелочного раствора. Есть версия применения термина «Проявление». Фотографии в фотоальбомах ваших бабушек и дедушек формировались по аналогичной технологии. Через оптическую систему фотоувеличителя черно-белая фотобумага экспонировалась, а затем проявлялась в растворе, который продавался в порошкообразном виде и назывался «Проявитель». Роль «маски» при экспонировании фотобумаги использовался кадр фотопленки из фотоаппарата. Отличие в том, что фотобумага для получения изображения воспринимала полутона, а в микроэлектронике полутонов нет -

маска даёт результат по принципу засвечен/не засвечен.

Фотолюбителям, которые печатали фотографии в домашних условиях, для получения нормальной фотографии важно было правильно растворить порошок (концентрация раствора) и вовремя выдернуть фотографию из раствора (время проявления), в противном случае фотографии получались слишком светлые или слишком тёмные. Испорченные листы бумаги выбрасывались.

В микроэлектронике технологический процесс очень дорогой и технологам необходимо при формировании техпроцесса правильно выбирать или рассчитывать параметры технологической операции, а именно: кислотность щелочного раствора и время проявления.



Рис.4. Результат технологической операции «Проявление фоторезиста»

4. Технологическая операция «Реактивное ионное травление кремния»

В результате четвертой технологической операции «Реактивное ионное травление кремния» материал кремния в открытых «окнах» для травления будет удалён.

Чтобы извлечь твёрдый материал, которым является кремний, необходимо перевести его в химическое соединение, которое является газообразным. В настоящее время используется переход в газообразное состояние с использованием плазмохимических установок. Фактически имеет место явление сублимации, когда образующиеся молекулы тетрафторида кремния тут же улетучиваются от поверхности кремния. Очень упрощённо реакция идёт по формуле $\text{Si} + 2\text{F}_2 \rightarrow \text{SiF}_4$.

В качестве рабочего газа выбираются галогеноуглеводороды, которые являются источником фтора. Плазма переводит их в состояние содержащее свободные радикалы, которые и позволяют переводить кремний в газообразное состояние за счёт образования летучего тетрафторида кремния.

Посмотрите внимательно фрагмент мультимедийного пособия от {4:07} до {4:26}. В анимации наглядно показан бомбардирующий поток химически активных частиц и вылетающие частички газообразного связанного кремния.

Добавка кислорода в плазму четырехфтористого углерода CF_4 увеличивает отношение фтора к углероду F/C. Существует предположение, что кислород, наряду с удалением углеродных атомов (CO и CO_2) с поверхности подложек, в газовой фазе реагирует с CF_4 , освобождая атомы фтора, в результате в плазме растёт отношение F/C, способствуя повышению скорости травления кремния.

Плазмохимическое травление состоит из следующих стадий:

- 1) транспорт реактивных частиц плазмы к поверхности обрабатываемого материала;
- 2) адсорбция реактивных частиц на поверхности;
- 3) собственно химическая реакция с образованием летучего соединения;
- 4) десорбция молекул продукта реакции с поверхности;
- 5) удаление молекул продукта реакции из приповерхностной области.

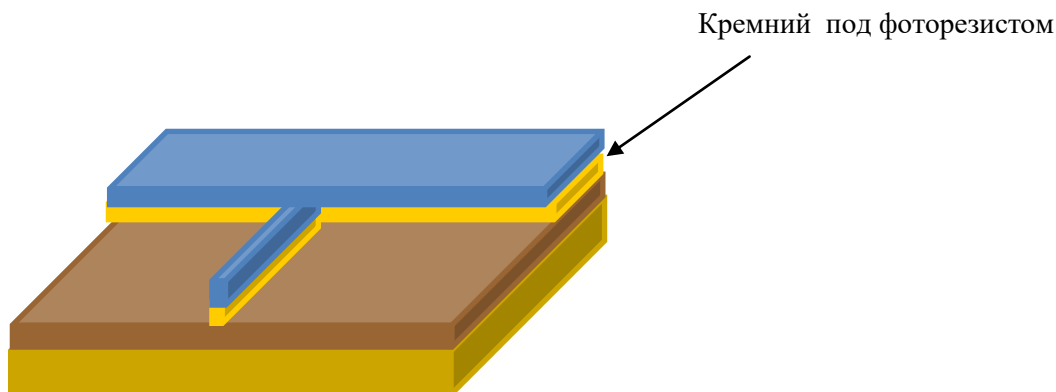


Рис.5. Результат технологической операции «Реактивное ионное травление» кремния»

5. Технологическая операция «Удаление остатков фоторезиста»

После удаления участков верхнего слоя кремния методом реактивного ионного травления фоторезист становится не нужен - он выполнил свою функцию в технологическом процессе и остатки этого фоторезиста можно удалить.

В третьей операции были проявлены засвеченные участки фоторезиста, при этом применяемый щелочной раствор никак не повлиял на состояние материала назасвеченного участка фоторезиста, поэтому для удаления остатков фоторезиста Вам нужен другой раствор.

В микроэлектронике для удаления остатков фоторезиста используется смесь КАРО - раствор серной кислоты H_2SO_4 и перекиси водорода H_2O_2 в соотношении 2:1 при температуре 90-150 °С. В результате химической реакции $H_2SO_4 + H_2O_2 = H_2SO_5 + O$. Атомарный кислород активно взаимодействует с органическими веществами, в нашем случае это фоторезист, который затем эмульгируется и растворяется.

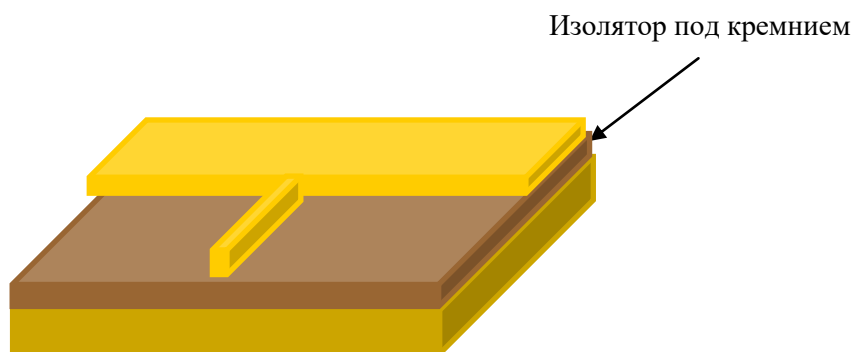


Рис.6. Результат технологической операции «Удаление остатков фоторезиста»

Технологическая операция проводится на оборудовании в виде химических ванн, см. фрагмент мультимедийного пособия от {5:17} до {5:25}. Вы видите, что пластины с микроструктурами МЭМС-изделия помещаются в ванну с бурлящим раствором смеси КАРО.

Агрессивные свойства смеси КАРО к любым органическим загрязнителям используется для очистки поверхности микроэлектронных заготовок, поэтому в результате проведения пятой технологической операции «Удаление остатков фоторезиста» будет сформирована заготовка из кремния и изолятора без каких-либо вспомогательных материалов и загрязнений.

При определении параметров технологической операции технолог задает температуру нагрева смеси и время проведения технологической операции. Для получения качественной очистки микроструктуры важно правильно приготовить раствор смеси КАРО. Известен объём ёмкости для раствора смеси КАРО в установке. Технолог должен произвести расчёт объемных частей серной кислоты и перекиси водорода.

6. Технологическая операция «Изотропное травление изолятора»

В результате шестой заключительной технологической операции «Изотропное травление изолятора» получается МЭМС-устройство «Кантилевер» (см. рис.1.). Технологу нужно решить задачу вытравливания изолятора под балкой, при этом под держателем изолятор в качестве опоры должен остаться. Задача решается с применением изотропного травления, а именно равномерного вытравливания по всем направлениям. (Изотропíя, изотро́пность — одинаковость физических свойств во всех направлениях, инвариантность, симметрия по отношению к выбору направления).

Материал изолятора это двуокись кремния, в чистом виде это кварц и является основной частью обычного стекла. Газообразный фтороводород производит травление двуокиси кремния по реакции $4\text{HF} + \text{SiO}_2 = \text{SiO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Продукт реакции четырёх фтористый кремний SiF_4 является летучим соединением и таким образом удаляется с поверхности нижнего слоя кремния.

Посмотрите фрагмент мультимедийного материала от {5:25} до {6:12}. Рассмотрите кадры {5:40}. {5:41}. {5:42} передвигая движок в режиме паузы. Хорошо видно как молекулы фтористого водорода, благодаря присущему для него свойству изотропности «подтравливает» изолятор под балкой, с такой же скоростью фтористый водород подтравливает и изолятор и под держателем, который в пять раз шире балки. В момент времени, когда под балкой не остаётся изолятора, под держателем оказывается вытравленным лишь часть изолятора. В нашем случае это 0,2 от его ширины, значит задача технолога решена – 0,8 ширины держателя остаётся в качестве опоры для держателя.

Реакция проводится в установке плазмохимического травления при температуре 90⁰С. Технологу необходимо рассчитать количество стравливаемой двуокиси кремния, затем определить концентрацию фтористого водорода в водном растворе.

Источники информации

- 1) Вязкость жидкостей. https://tau-rus.com/vyazkost_zhidkosti_sst
- 2) Физика равновесия сил. Раздел 2.1.2 стр.22-25
http://window.edu.ru/resource/498/78498/files/miem_lapshinov.pdf
- 3) Описание различных марок фоторезистов. <https://frast.ru/book2017.pdf>
- 4) Позитивный и негативный фоторезист.
https://studbooks.net/719062/tehnika/pozitivnye_negativnye_fotorezisty
- 5) Литографические процессы <https://phys.vsu.ru/me/downloads/m13-89.pdf>
- 6) Энергия экспонирования <https://www.uv-expert.ru/info/articles/uv-lamp-power-and-measuring/>