

**МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ ЗАПРОСА ДЛЯ
ЗАКУПКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ ПО ВЫПУСКУ
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ
КОМПОНЕНТОВ УРОВНЯ ТОПОЛОГИИ 90 нм
(Технология КМОП: основное технологическое
оборудование, требования к техническим
характеристикам)**

Москва
2009

СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ	3
2.	ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО ВЫПУСКУ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ С МИНИМАЛЬНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ЗАДЕЙСТВОВАННЫХ ЕДИНИЦ ОБОРУДОВАНИЯ – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НИИСИ РАН	5
3.	СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЛИНИЙ В РАМКАХ МИНИФАБРИКИ И ТРАДИЦИОННОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА	13
4.	БАЗОВЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС КМОП УРОВНЯ 90 нм. ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ	14
4.1.	ВАЖНЕЙШИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЗОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УРОВНЯ 90 НМ	14
4.2.	БАЗОВЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС КМОП УРОВНЯ 90 НМ. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ОПЕРАЦИЙ	18
5.	ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОБОРУДОВАНИЯ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО УНИТАРНЫЕ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА	22
5.1.	ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	23
5.2.	ЛИТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	26
5.3.	ОБОРУДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	27
5.4.	ОБОРУДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	28
5.5.	ОБОРУДОВАНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ	29
5.6.	ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ	30
5.7.	ОБОРУДОВАНИЕ НАНЕСЕНИЯ СЛОЕВ	31
5.8.	ОБОРУДОВАНИЕ ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЛАНАРИЗАЦИИ	32
5.9.	МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	33
6.	ССЫЛКИ	34

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящий документ предназначен для использования в качестве **справочного материала** при составлении технических запросов по закупке технологического оборудования, применяемого в производстве твердотельных электронных компонентов, изготавливаемых **по технологии КМОП топологического уровня 90 нм**.

Документ содержит укрупненное схематическое описание технологического процесса КМОП указанного уровня, а также основные требования к характеристикам используемого в данном процессе оборудования. Требования, приведенные в настоящем документе, были определены с учетом основных отличий между технологическими процессами уровня 130 нм и 90 нм (ужесточенные требования к параметрам литографии, параметрам плазменных и жидкостных процессов; использование полупроводниковых напряженных слоев, новых типов LOW-K межслойной изоляции и т.д.).

Приведенные ниже в документе (**п.5 – ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОБОРУДОВАНИЯ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО УНИТАРНЫЕ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА**) основные требования к характеристикам оборудования в части его необходимой производительности, а также стоимости используемых материалов в расчете на пластину, соответствуют случаю **организации стандартного полупроводникового производства большой производительности (до 50000-100000 пластин в год, выход годных – не менее 90%)**. В зависимости от типа организуемого производства эти параметры могут заметно варьироваться при сохранении (или незначительной модификации) основных технических характеристик выпускаемой продукции, а также базовых требований к характеристикам технологических операций. Так, к примеру, при организации **мелкосерийного производства специальной электронной компонентной базы широкого спектра** по технологии КМОП некоторые из перечисленных ниже технологических операций могут быть реализованы в пределах меньшего количества технологических установок, чем это требуется в условиях стандартной полупроводниковой фабрики. При этом производительность технологической линии будет значительно уменьшена, в частности, по причине необходимости простоя партий в ожидании выхода установок на требуемый режим работы после межоперационной очистки технологических камер. В интересах удешевления производства, минимизации площадей и т.д. допускается также **видоизменение технических требований к характеристикам технологических операций, не влекущее за собой значительного ухудшения выходных характеристик производимой продукции (однако, способное понизить выход годных в пределах допустимых значений, зависящих от задач, решаемых линией)**. По этой причине в документе (**п.3 – СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДСТВА В**

РАМКАХ МИНИФАБРИКИ И ТРАДИЦИОННОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА) приведены основные сравнительные характеристики полупроводниковых производств в рамках минифабрики и традиционного производства, дающие представление о величине возможной разницы между этими двумя подходами, как в плане затрачиваемых средств, так и с точки зрения характеристик производимой продукции.

Таким образом, задача построения технологической линии по выпуску электронных компонентов требует весьма серьезной проработки всех возможных вариантов оснащения необходимым оборудованием с учетом ряда зачастую противоречивых требований, предъявляемых к таким параметрам, как **итоговая стоимость линии, виды выпускаемой продукции, производительность, выход годных, время прохождения партии пластин, возможность перевода линии на выпуск компонентов разных типов, возможность модернизации линии под новые уровни технологии** и пр. Должны быть проведены все необходимые переговоры с фирмами-поставщиками оборудования в части определения возможностей предлагаемых установок, вариантов их модификации под требования заказчика. Только после подобной проработки возможно окончательное формирование технического запроса на закупку оборудования для оснащения разрабатываемой линии. При этом в подавляющем большинстве вариантов возникнет **необходимость создания оригинальных технологических маршрутов, адаптированных именно под разрабатываемое производство**. Ниже приведен пример данной ситуации.

2. ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ТЕХОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО ВЫПУСКУ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ С МИНИМАЛЬНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ЗАДЕЙСТВОВАНЫХ ЕДИНИЦ ОБОРУДОВАНИЯ – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НИИСИ РАН

В качестве примера, исчерпывающе разъясняющего данную ситуацию, можно рассмотреть случай производственной линии НИИСИ РАН, организованной около 10 лет назад на и предназначенной для мелкосерийного (5-25 150 мм пластин в партии) выпуска специальной электронной компонентной базы (логических схем) по нормам топологии 0,5-0,35 мкм [1]. Разработка технологических маршрутов для этой линии производилась при участии специалистов технологической организации **IMEC*** (Бельгия). Ниже перечислены основные особенности технологии, разработанной специально под эту линию.

- **Использование быстрых термических процессов при формировании подзатворного окисла вместо традиционного процесса окисления при атмосферном давлении (отсутствие диффузионных печей)**

Данная особенность технологии на момент разработки конфигурации оборудования комплекса вызывала серьезный риск получения подзатворного окисла низкого качества.

При выборе конфигурации оборудования, предназначенного для формирования затворного узла, **рассматривались следующие варианты:**

- а) использование отдельных единиц оборудования для проведения процессов термической обработки при атмосферном давлении (стандартной печи), оборудования быстрой термической обработки (обязательного для формирования мелких р-п переходов) и оборудования осаждения поликремния из газовой фазы;
- б) решение всех задач термической обработки и осаждения поликремния в рамках одной единицы оборудования – кластерной установки.

* Основным родом деятельности Международного Центра полупроводниковой технологии **IMEC** (Бельгия) является реализация исследовательских программ по разработке новейших технологий, применяемых в полупроводниковой промышленности, в частности, технологий производства КМОП СБИС. В настоящее время, помимо европейских исследовательских организаций и университетов, партнерами **IMEC** являются такие крупнейшие производители полупроводниковых компонентов и оборудования для электронной промышленности, как **Intel** и **Texas Instruments** (США), **Panasonic** (Япония), **Samsung** (Корея), **TSMC** (Тайвань), **Infineon** (Германия), **Philips** (Нидерланды), **STS** (Швейцария), **ASML** (Нидерланды), **Carl Zeiss** (Германия) и др.

Использовались следующие критерии:

- a) минимальные суммарные затраты (включая затраты на техническое обслуживание при эксплуатации и потребление энергоресурсов);
- b) минимальная суммарная занимаемая площадь;
- c) наличие перспективы использования приобретенного оборудования в технологических процессах новых поколений (до 0,18 мкм).

Оценки, сделанные на момент разработки конфигурации оборудования комплекса, **дали следующие результаты:**

- a) по сообщению ведущих фирм-изготовителей технологического оборудования (**Applied Materials, Eaton** (ныне – **Axcelis**), **CVC**), процесс формирования затворного узла с использованием быстрого термического окисления изучен и может быть использован без ущерба для качества подзатворного окисла;
- b) в мировой микроэлектронике отсутствовало (по состоянию тот момент) оборудование термической обработки пластин при атмосферном давлении, совмещенное с оборудованием осаждения поликремния в пределах одной единицы кластерного оборудования для получения затворного узла в рамках одного блока операций;
- c) суммарные затраты на использование трех отдельных единиц оборудования примерно в 2 раза превышают затраты на использование одной единицы – кластерной установки;
- d) три отдельных единицы оборудования занимают полезную площадь, в три раза превышающую площадь, занимаемую одной единицей кластерного оборудования.

В результате анализа всех этих факторов и учета вышеперечисленных критериев выбор был сделан в пользу варианта кластерной конфигурации оборудования в виде установки **HT POLY Centura (Applied Materials)**, предназначенной для формирования затворного узла, а также для проведения других операций термической обработки.

- **Использование щелевой изоляции (STI – Shallow Trench Isolation) вместо традиционно применяемого для уровня процессов 0,5/0,35 мкм метода LOCOS (LOCal Oxidation of Silicon), при этом, сам метод получения щелевой изоляции нестандартен**

Данная особенность технологии могла вызвать риск получения некачественной изоляции активных элементов схемы.

При выборе конфигурации оборудования, предназначенного для формирования изоляции активных элементов, **рассматривались следующие варианты:**

- a) **для варианта изоляции методом LOCOS:** оборудование травления кремния, оборудование термического окисления при повышенном давлении, оборудование осаждения нитрида кремния из газовой фазы, оборудование травления нитрида кремния, оборудование удаления нитрида кремния в жидкой фазе;
- b) **для варианта изоляции методом STI с применением нитрида кремния в качестве буферного слоя:** оборудование травления кремния, оборудование осаждения нитрида кремния из газовой фазы, оборудование травления нитрида кремния, оборудование удаления нитрида кремния в жидкой фазе, оборудование химико-механической планаризации (CMP);
- c) **для варианта изоляции методом STI с применением поликремния в качестве буферного слоя (по технологии фирмы Samsung):** оборудование травления кремния, оборудование осаждения поликремния из газовой фазы, оборудование химико-механической планаризации (CMP).

При выборе конфигурации оборудования использовались следующие критерии:

- a) минимальные суммарные затраты на оборудование (включая затраты на техническое обслуживание при эксплуатации и потребление энергоресурсов);
- b) минимальная суммарная занимаемая площадь;

При выборе метода изоляции активных элементов схемы использовались следующие критерии:

- a) минимальные суммарные затраты на оборудование (включая затраты на техническое обслуживание при эксплуатации и потребление энергоресурсов);
- b) удовлетворительные характеристики качества изоляции (в том числе, значение порогового напряжения паразитного транзистора, искажение топологического рисунка активного элемента и пр.);
- c) наличие перспективы использования приобретенного оборудования в технологических процессах новых поколений (до 0,18 мкм).

Оценки, сделанные на момент разработки конфигурации оборудования комплекса, **дали следующие результаты:**

- a) использование метода **LOCOS** требовало дополнительного приобретения 4-х единиц оборудования суммарной стоимостью порядка **8,5 млн. долл. США** (оборудование химико-механической планаризации входит в основную конфигурацию технологической линии для операций формирования межуровневой изоляции), увеличивающего площадь, занимаемую линией, приблизительно на 30%;

- b) возможности использования метода для процессов менее 0,35 мкм представлялись сомнительными (в настоящее время доказана возможность применения метода **LOCOS** для процесса 0,18 мкм, однако метод **STI** считается предпочтительным);
- c) использование метода **STI** с применением нитрида кремния требует дополнительного приобретения 3-х единиц оборудования суммарной стоимостью порядка **6,5 млн. долл. США**, увеличивающего площадь, занимаемую линией, приблизительно на 20%;
- d) использование метода **STI** с применением поликремния не требует приобретения дополнительного оборудования (оборудование осаждения поликремния из газовой фазы входит в основную конфигурацию линии для операций формирования затворного узла);
- e) в настоящее время накоплены данные о качестве изоляции по методу фирмы **Samsung** методом **STI** с применением поликремния, в том числе, о значениях пробивного напряжения сток-подложка не менее 10 В, порогового напряжения паразитного n-канального транзистора – не менее 50 В, что превосходит характеристики изоляции методом **LOCOS** и не уступает аналогичным характеристикам изоляции методом **STI** с применением нитрида кремния.

В результате анализа всех этих факторов и учета вышеперечисленных критериев выбор был сделан в пользу процесса формирования изоляции активных элементов схемы методом **STI** с применением поликремния, не требующим приобретения дополнительных единиц оборудования.

- **Концентрирование всех обработок в жидкой фазе (химические очистки, травление окисла) в рамках одной единицы оборудования LT-210 (Semitool)**

Данная особенность конфигурации линии чревата плохо прогнозируемым увеличением длительности технологического цикла.

При выборе конфигурации входящего в состав линии оборудования влажной химической обработки пластин рассматривались варианты приобретения нескольких единиц оборудования.

Использовались следующие критерии:

- a) минимальные суммарные затраты на оборудование (включая затраты на техническое обслуживание при эксплуатации и потребление энергоресурсов);
- b) минимальная суммарная занимаемая площадь;
- c) приемлемое относительное увеличение длительности технологического цикла.

Оценки, сделанные на момент разработки конфигурации оборудования комплекса, **дали следующие результаты:**

- a) использование двух единиц оборудования влажной химической обработки пластин уровня установки **LT-210** в составе линии вместо одной увеличивает ее стоимость на сумму не менее **1,5 млн. долл. США;**
- b) использование двух единиц оборудования увеличивает площадь, занимаемую линией, на 6-7%;
- c) использование только одной единицы оборудования увеличивает длительность технологического цикла по сравнению с традиционными значениями для процессов того же поколения в среднем на 20%.

В результате учета вышеперечисленных критериев выбор был сделан в пользу конфигурации оборудования линии с использованием только одной установки **LT-210 (Semitool)**.

- **Использование нестандартных подходов к удалению остатков фоторезиста после воздействия на него ионных пучков большой мощности**

Задачи удаления остатков резиста до 2004 года решались путем **нештатного использования** других единиц оборудования в составе линии, в том числе, технологической камеры **ASP** (Advanced Strip and Passivation) кластерной установки **Metal Etch Centura (Applied Materials)**. Вариант приобретения оборудования для плазмохимического удаления фоторезиста и полимера не рассматривался из-за отсутствия финансирования.

В 2004 году в состав линии была включена установка плазмохимического удаления фоторезиста и полимера **RapidStrip 210 (Axcelis)**.

Перечень технологического и контрольно-измерительного оборудования технологической линии НИИСИ РАН с указанием их основных особенностей приведен в **Таблице 1**.

Таблица 1. Перечень технологического и метрологического оборудования линии НИИСИ РАН

Наименование оборудования	Основные особенности
Технологическое оборудование	
Установка химико-механической планаризации AvantGaard 676-4 (IPEC-Planar)	Химико-механическая планаризация окисла и вольфрама
Установка химической очистки в жидкой фазе LT-210 (Semitool)	Химическая очистка на основе плавиковой кислоты и озона, травление окисла в парах плавиковой кислоты
Установка травления металлических слоев METAL ETCH Centura (Applied Materials)	Травление металла, удаление резиста
Установка травления диэлектрических и полупроводниковых слоев Centura 5200 OXIDE ETCH SYSTEM (Applied Materials)	Травление диэлектриков
Установка нанесения диэлектрических слоев Centura 5200 DCVD SYSTEM (Applied Materials)	Химическое осаждение диэлектриков из газовой фазы
Установка осаждения металлических слоев ENDURA PVD (Applied Materials)	Выполняются процессы формирования силицида, осаждения вольфрама и шин металлизации
Установка ионного легирования PRECISION IMPLANT xR120 (Applied Implant Technology)	Имплантация ионов бора и фосфора. Для легирования с энергиями более 120 кэВ используются многозарядные ионы. Максимальный угол легирования 7°
Установка термической обработки и осаждения слоев поликремния HT POLY Centura (Applied Materials)	Выполняются процессы быстрого термического окисления (в сухом кислороде), быстрого термического отжига, формирование затворного узла без выгрузки пластин в атмосферу, удаления поликремния в HCl

Таблица 1 (продолжение)

Установка обработки пластин в парах ГМДС Millenium 2000 Vapor Prime/Bake-Chill (SITE Services)	Гидрофобизация поверхности перед нанесением антиотражающего покрытия и фоторезиста
Установка нанесения антиотражающего покрытия SITE Tractrix System (SITE Services)	
Установка нанесения фоторезиста Millenium 2000 Coat-Bake-Chill (SITE Services)	Используется фоторезист марки SPR 955 CM толщиной 0,6-1,8 мкм
Установка прямой пошаговой мультипликации (степпер) PAS 5500/250C (ASML)	Оборудование специфицировано под минимальный размер 0,3 мкм (i-линия)
Установка проявления фоторезиста Millenium 2000 Coat-Bake-Chill (SITE Services)	
Установка удаления фоторезиста в кислородной плазме BobCat 208S (Matrix Integrated Systems)	
Метрологическое оборудование	
Система измерения толщины диэлектрических, фоторезистивных и полупроводниковых слоев и структур, коэффициентов отражения и преломления NanoSpec 8000 XSE (Nanometrix)	Измерения на основе эллипсометрии и спектрофотометрии
Система автоматического измерения поверхностного сопротивления RES MAP 168 (Creative Design Engineering)	Измерения проводятся на основе четырехзондового метода только на аттестационных пластинах
Система контроля дефектности топологического рисунка на пластине Leica INS 3000 UV (Leica Microsystems)	
Система анализа примесей методом рентгено-флуоресцентной спектроскопии TXRF 8030W (ATOMIKA Instruments)	Измерения проводятся только на аттестационных пластинах

Таблица1 (продолжение)

Система измерения характеристик рельефа поверхности полупроводниковых пластин Dektak V200SL (Veeco Instruments)	Измерения проводятся только на аттестационных пластинах
Сканирующий электронный микроскоп Leo 1455VP (LEO Electron Microscopy)	Используется для контроля критических размеров на рабочих пластинах (не специфицирован под измерение критических размеров)
ИК Фурье-спектрометр FTIR (PerkinElmer Instruments)	Измерения проводятся только на аттестационных пластинах
Система контроля привносимой дефектности на поверхности пластин Reflex 300 (ООО «Рефлекс Лайт»)	Измерения проводятся только на аттестационных пластинах
Система измерения дозы легирующей примеси и толщины пленок металлов TWIN-SC2 (TePla AG)	Измерения проводятся только на аттестационных пластинах

Итак, основными отличиями данного набора оборудования от стандартного набора, используемого на серийных предприятиях, являются:

- отсутствие диффузионных печей для проведения термических окислений при атмосферном давлении;
- отсутствие оборудования для стандартных химических обработок;
- отсутствие оборудования для осаждения нитрида кремния;
- использование по всему маршруту (за исключением операций ионного легирования) кластерного оборудования с поштучной обработкой пластин (в настоящее время подобный подход принят и на значительной части стандартных полупроводниковых производств);
- отсутствие оборудования для измерения критических размеров (CD SEM).

Кроме обозначенных выше специфических особенностей технологического процесса, реализованного на данной линии, можно отметить также использование в операциях химической обработки вместо процесса «КАРО» (процесс на основе смеси серной кислоты и перекиси водорода) процесса поштучной химической обработки с использованием т.н. «флуорозона» (раствор вода-плавиковая кислота-озон).

3. СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЛИНИЙ В РАМКАХ МИНИФАБРИКИ И ТРАДИЦИОННОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сравнение основных характеристик производственных линий в рамках минифабрики и традиционного полупроводникового производства приведено в Таблице 2.

Таблица 2 Некоторые сравнительные характеристики полупроводниковых фабрик в рамках традиционного производства и минифаба

Характеристика	Традиционное производство	Мелкосерийная минифабрика на основе ограниченного набора модульно-кластерного оборудования
Тип продукции	Несколько массовых СБИС	Множество специализированных СБИС
Литографическое оборудование	Высокопроизводительное оптическое	Может быть использовано как оборудование, предназначенное для стандартного производства, так и нестандартные установки, обеспечивающие высокий уровень качества литографии, однако проигрывающие в производительности стандартным образцам оборудования (например, электронно-лучевые литографы или установки наноимпринта)
Обработка пластин	В партиях и индивидуально	Только индивидуально
Операции травления	30% жидкостные	В основном, сухие операции
Термические операции	Партиями по 25-30 пластин (диффузионные печи)	Только быстрые термические процессы
Перенос пластин	Различные виды контейнеров	Только SMIF- и FOUP-контейнеры (300 мм пластины) с наддувом чистым азотом
Требуемый выход годных	Не менее 90%	В некоторых случаях допускается выход порядка 40-50%
Требуемый класс чистых помещений	10 и лучше	100-1000
Площадь чистых помещений	4500-10000 м ²	270-600 м ²
Стоимость производства	700-1500 млн. долл. США в зависимости от уровня технологии	50-400 млн. долл. США в зависимости от уровня технологии и решаемых задач
Время полного цикла	4-16 недель	Мин. 3-е суток

4. БАЗОВЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС КМОП УРОВНЯ 90 нм. ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ

4.1. ВАЖНЕЙШИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЗОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УРОВНЯ 90 НМ

Технологический процесс КМОП уровня 90 нм является «переходным звеном» от процесса 130 нм к более продвинутым, сохранив основную массу операций, принятых в технологии уровня 130 нм. При этом также остается сохраненным основной состав используемого технологического оборудования, за исключением отдельных позиций.

Основной особенностью этого процесса по сравнению с предыдущими поколениями технологии выступает использование так называемых «напряженных слоев кремния». Это решение направлено напрямую на увеличение скорости работы транзисторов, образующих ядро процессора. Его принцип заключается в растяжении (в случае n-канальных транзисторов) или сжатии (для p-канальных транзисторов) материала канала транзистора (правильной кристаллической решетки кремния). Это приводит к увеличению электронно-дырочной проводимости, т.е. ускорению прохождения электрического тока через канал за счет снижения его сопротивления (до 30% на p-канальных транзисторах и до 10% на n-канальных транзисторах), за счет чего увеличивается скорость переключения транзисторов. Сжатие или растяжение правильной структуры кристаллической решетки кремния в общем случае является ее «напряжением», что и отразилось в названии данной особенности технологического процесса [2].

Один из простейших способов создания таких транзисторных структур с «напряженным» каналным слоем, позволяющий добиться новых характеристик активных элементов схемы без внесения в технологический процесс принципиально новых операций, представлен на **Рис.1** (процесс создания «сжатого» каналного слоя p-канального МОП-транзистора). В отличие от подхода, «традиционного» на момент разработки данной технологии, применяемого для получения «растянутых» полупроводниковых слоев, когда кремниевая пленка осаждалась непосредственно на слой релаксированного кремний-германиевого сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, в данном случае для получения «растянутых» слоев использовалось нанесение поверх

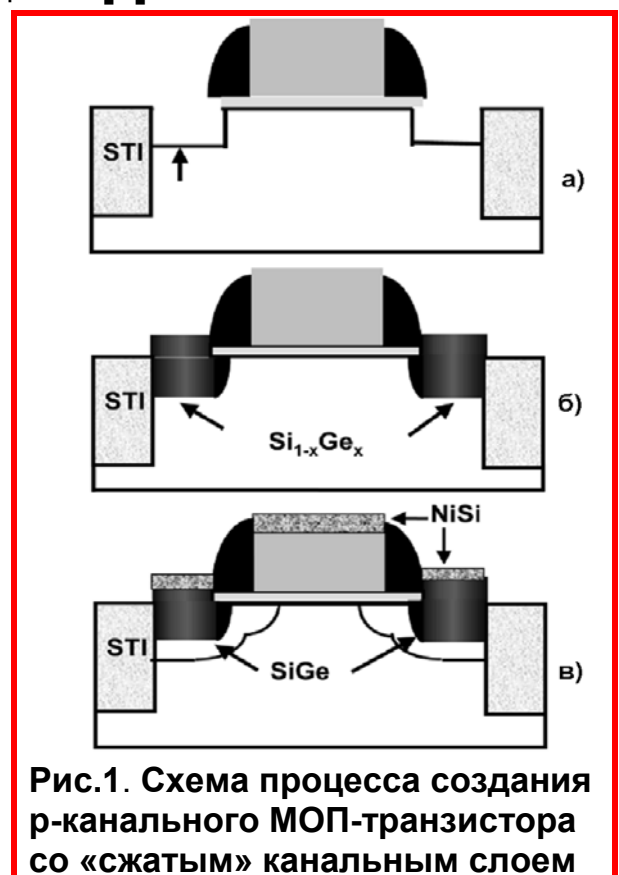
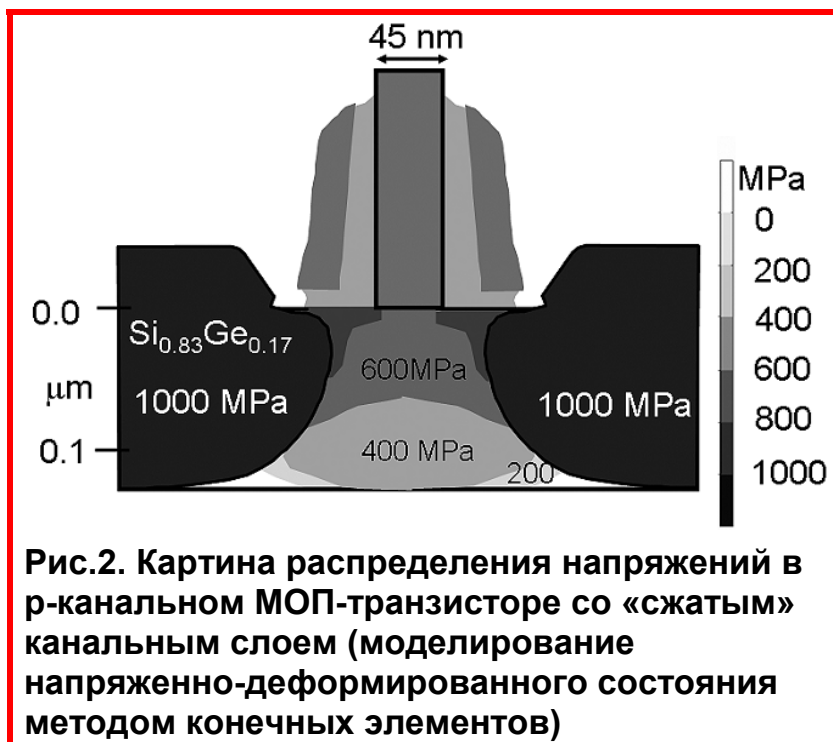


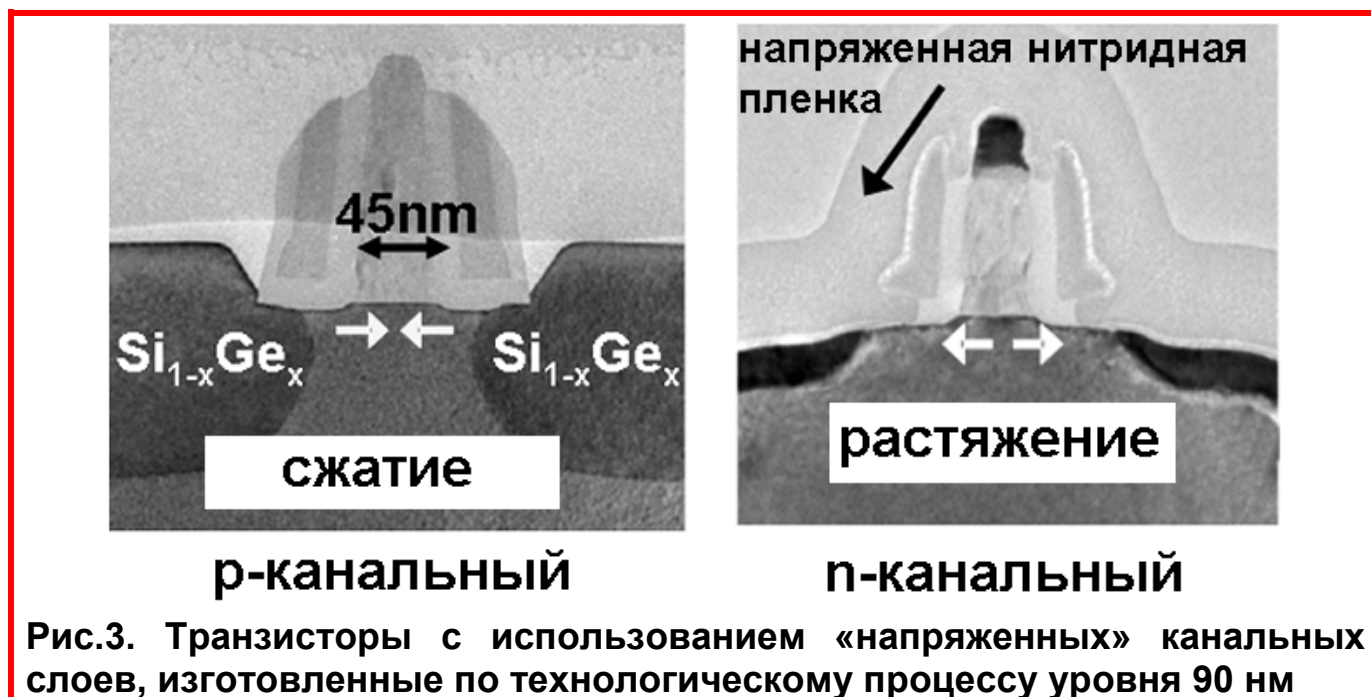
Рис.1. Схема процесса создания р-канального МОП-транзистора со «сжатым» каналным слоем

транзисторной структуры сильно напряженных нитридных слоев, вызывающих общее «растяжение» транзистора (включая его канальную область), «сжатие» же канальной области вызывалось путем использования в качестве материалов истока и стока р-канального транзистора этого же сплава $\text{Si}_{0,83}\text{Ge}_{0,17}$. Картина распределения напряжений в р-канальном транзисторе такого типа представлена на **Рис.2**.



Формирование кремний-германиевых стоков и истоков р-канального транзистора в рамках традиционного технологического процесса уровня 90 нм осуществляется путем вытравливания соответствующих областей в кремнии после формирования спейсера и последующего локального химического осаждения из газовой фазы (CVD) заполняющего образовавшиеся полости полупроводникового материала требуемого состава.

На **Рис.3** изображены электронно-микроскопические снимки обоих типов транзисторов, создаваемых в рамках данного технологического процесса.



Другая особенность технологического процесса данного уровня заключается в усовершенствовании конструктивно-технологических параметров транзистора (помимо сокращения их геометрических размеров, являющегося безусловным свойством каждого нового уровня технологии). Транзисторы, изготовленные по технологическому процессу уровня 90 нм, характеризуются 50-нм толщиной затвора, изготавливаемого из поликристаллического кремния с применением покрытия из **силицида никеля (NiSi)** – материала, обладающего более низким линейным электрическим сопротивлением по сравнению с используемым ранее дисилицидом кобальта (**CoSi₂**). Толщина диэлектрического слоя затвора в 90-нм транзисторах составляет 1,2 нм, последний изготавливается из **обычного диоксида кремния (SiO₂)**, который хорошо зарекомендовал себя на протяжении предыдущих 30 лет в качестве подзатворного диэлектрика, прежде всего, вследствие простоты его изготовления. Как известно, оксидный слой изготавливается прямо «на месте», посредством термического окисления поверхности подложки. Технологический процесс уровня 90 нм является последним поколением технологии КМОП, в котором в качестве подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов все еще используется окисел, тогда как в процессах последующих поколений осуществлен переход на использование специальных **Hi-k** диэлектрических слоев, обладающих повышенной диэлектрической константой по сравнению с традиционным оксидным слоем.

Технологический процесс уровня 90 нм включает в себя использование **7-слойных медных соединений** высокой плотности (против 6-ти слоев металлизации в процессе уровня 130 нм), а также **нового типа диэлектрика с низкой диэлектрической константой (Low-k)**, представляющего собой нитрид кремния (**SiN**) в сочетании с оксидным материалом, допированным углеродом (**carbon-doped oxide, CDO**). Это позволяет снизить «межслойную» емкость на 18-20% по сравнению с применяемым в 130-нм техпроцессе оксифторидом кремния (**SiOF**), что ускоряет «внутричиповую» коммуникацию и снижает потребляемую схемой мощность.

Интегральные схемы, изготовленные по технологическому процессу КМОП уровня 90 нм, обладают следующими основными характеристиками с точки зрения технологии изготовления:

- во всех типах изделий, изготавливаемых по указанному технологическому процессу, используется изоляция активных областей мелкими канавками (**STI**);
- затворы (поликристаллический кремний) и сток-истоки плакируются силицидом никеля (так называемый процесс силицидирования – напыление металла на всю пластину с последующей термообработкой, трансформирующей металл на открытых от диэлектрика участках в силицид, с последующим удалением непрореагировавшего металла);

- плавающий затвор в опции flash-памяти выполняется из аморфного или поликристаллического кремния, материалом изоляции плавающего затвора от управляющего может служить нитрид титана;
- диэлектриком конденсатора, обычно выполняемого между двумя слоями поликремния (опция ЦАП/АЦП) служит окисленный нитрид кремния;
- в качестве материала резисторов используется поликристаллический кремний, легированный до требуемой концентрации;
- изоляционный слой под первым металлом выполняется из комбинации нелегированных/легированных слоёв диэлектрика, преимущественно двуокиси кремния и планаризуется методом CMP;
- первый слой металлизации используется для локальных межсоединений и формируется из сплава на основе алюминия с добавками меди и кремния, с подслоем нитрида титана / титана;
- промежуточные слои металлизации выполняются из меди с барьерными слоями из нитрида титана или нитрида тантала по так называемому двойному дамасскому процессу (в материале межслойной изоляции в местах будущих шин металлизации травятся канавки, затем вскрываются окна к нижележащему слою металла, напыляется барьерный слой, затем осаждается медь и посредством химико-механической планаризации меди (удаление меди с поверхности диэлектрика) формируется окончательная структура);
- в качестве материала межслойной изоляции используются материалы с малой величиной диэлектрической проницаемости (так называемые **Low-k** диэлектрики);
- контактные окна заполняются вольфрамом с подслоем нитрида титана;
- последний слой металлизации выполняется по технологии первого слоя, также с вольфрамовыми вставками для обеспечения совместимости со стандартными технологиями разварки. При использовании новых технологий сборки (flip-chip, CSP и т. д.), верхний слой также может быть медным.

4.2. БАЗОВЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС КМОП УРОВНЯ 90 НМ. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Укрупненное описание технологического процесса КМОП приведено в **Таблице 3**. Перечисляются основные технологические операции, используемые в технологическом процессе уровня 90 нм. Под таковыми понимаются операции, в которых один или несколько переходов технологического процесса выполняются внутри одной единицы технологического оборудования без вмешательства оператора.

Таблица 3. Технологические операции, используемые в основных блоках технологического процесса (метрологические операции не отражены)

№ блока	Блок операций	Используемые операции
1	Формирование активных областей (STI-изоляция)	Обработки в жидкой фазе, окисление, осаждение* нитрида, осаждение окисла, нанесение резиста и антиотражающего слоя, литография, реактивно-ионное травление нитрида/окисла/кремния, плазмохимическое снятие резиста, ионная имплантация, химико-механическая планаризация
2	Формирование карманов	Обработки в жидкой фазе, нанесение резиста и антиотражающего слоя, литография, плазмохимическое снятие резиста, ионная имплантация
3	Формирование профилей распределения примесей рабочих структур	Обработки в жидкой фазе, нанесение резиста и антиотражающего слоя, литография, плазмохимическое снятие резиста, ионная имплантация
4	Формирование затворов	Обработки в жидкой фазе, нанесение резиста и антиотражающего слоя, литография, плазмохимическое снятие резиста, ионная имплантация, окисление, напыление** нитрида вольфрама, напыление вольфрама, осаждение поликремния, осаждение окисла, осаждение нитрида кремния, реактивно-ионное травление затворного узла (P-SiN/W/WN; polySi), реактивно-ионное травление окисла, реактивно-ионное травление нитрида
5	Формирование конденсаторов и резисторов	Обработки в жидкой фазе, нанесение резиста и антиотражающего слоя, литография, плазмохимическое снятие резиста, ионная имплантация, осаждение нитрида кремния, термообработка, реактивно-ионное травление нитрида кремния, реактивно-ионное травление поликремния

* Под термином «осаждение» подразумевается химическое осаждение из газовой фазы (CVD)

** Под термином «напыление» подразумевается физическое нанесение (PVD), например, методом магнетронного распыления

Таблица 3 (продолжение)

№ блока	Блок операций	Используемые операции
6	Формирование сток-истоковых областей	Обработки в жидкой фазе, нанесение резиста и антиотражающего слоя, литография, плазмохимическое снятие резиста, ионная имплантация, реактивно-ионное травление кремния, осаждение сплава кремний-германий, реактивно-ионное травление сплава кремний-германий
7	Активация примесей	Быстрый термический отжиг
8	Салицидирование	Обработки в жидкой фазе, нанесение резиста и антиотражающего слоя, литография, плазмохимическое снятие резиста, напыление никеля, термообработка, травление непрореагировавшего металла
9	Формирование нижнего уровня изоляции	Обработки в жидкой фазе, нанесение резиста и антиотражающего слоя, литография, плазмохимическое снятие резиста, осаждение нитрида кремния, осаждение окисла, осаждение борофосфоросиликатного стекла, реактивно-ионное травление борофосфоросиликатного стекла, химико-механическая планаризация
10	Формирование многоуровневой металлической разводки с межслойной Low-k изоляцией	Обработки в жидкой фазе, нанесение резиста и антиотражающего слоя, литография, плазмохимическое снятие резиста, напыление вольфрама, осаждение вольфрама, напыление титана, напыление нитрида титана, осаждение нитрида кремния, осаждение титана, осаждение нитрида титана, напыление AlCu, реактивно-ионное травление low-k диэлектрика, реактивно-ионное травление металлов, нанесение нитрида тантала, напыление зародышевого слоя меди, электрохимическое осаждение меди, термический отжиг меди, осаждение low-k диэлектрика, нанесение low-k диэлектрика методом центрифугирования, химико-механическая планаризация металлов и диэлектриков
11	Финишные обработки	Осаждение защитного покрытия, утонение пластин, отжиг в форминг-газе, вскрытие контактных окон

Итак, основными операциями, используемыми в технологическом процессе уровня 90 нм, являются:

- нанесение резиста и антиотражающего слоя;
- совмещение и литография;
- обработка в жидкой фазе (несколько видов);
- ионная имплантация (несколько видов);

- плазмохимическое снятие резиста;
- быстрый термический отжиг;
- термическое окисление (быстрое и при атмосферном давлении);
- напыление вольфрама и нитрида вольфрама;
- осаждение поликремния и аморфного кремния;
- осаждение нитрида кремния;
- реактивно-ионное травление поликремния;
- реактивно-ионное травление кремния;
- реактивно-ионное травление нитрида кремния;
- реактивно-ионное травление сплава кремний-германий;
- осаждение сплава кремний-германий;
- напыление никеля;
- удаление никеля при операции салицидирования;
- напыление титана и нитрида титана;
- напыление AlCu;
- нанесение нитрида тантала;
- осаждение двуокиси кремния (легированной и нелегированной);
- реактивно-ионное травление двуокиси кремния;
- нанесение Low-k межслойной изоляции (химическое осаждение и центрифугирование);
- реактивно-ионное травление Low-k диэлектрика;
- реактивно-ионное травление AlCu и Ti/TiN;
- осаждение вольфрама;
- напыление зародышевого слоя меди;
- электрохимическое осаждение меди;
- химико-механическая планаризация диэлектрика;
- химико-механическая планаризация металлов;
- химико-механическая планаризация меди;
- нанесение пассивирующего слоя.

Кроме того, могут быть перечислены следующие виды метрологических унитарных операций технологического процесса:

- электронно-микроскопическое наблюдение и измерение параметров создаваемых структур;

- контроль дефектов на «голой» пластине;
- поиск и классификация дефектов литографии;
- контроль критических размеров литографии;
- контроль совмещения;
- измерение толщин осаждаемых пленок.

Приведение в данном документе описания технологического маршрута с полной последовательностью производимых технологических операций представляется нецелесообразным как по причине ограниченности объема документа, так и из соображений того, что разработка технологического маршрута является отдельной весьма трудоемкой задачей, которая должна быть решена (в некотором приближении) на начальном этапе работ по созданию технологической линии. Решение этой задачи непременно потребует проведения серии технологических ОКР, включающих в себя как работы по детальному математическому моделированию технологического процесса, так и разнообразные экспериментальные отработки отдельных операций технологии, несмотря на то, что стандартный технологический процесс уровня 90 нм, принятый на крупносерийных полупроводниковых производствах, является полностью отработанным. Удовлетворение ряду противоречивых требований, предъявляемых к производительности, спектру выпускаемой продукции, допустимым затратам на создание производства и пр., не сможет не отразиться на технологическом маршруте, разработанном под данное производство, как это было показано в п.2 настоящего документа.

5. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОБОРУДОВАНИЯ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО УНИТАРНЫЕ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА

Как было показано выше, подбор технологического оборудования, необходимого для оснащения производства полупроводниковых компонентов, – задача, требующая глубокой проработки и учета большого количества факторов и критериев, предъявляемых к будущему производству.

По этой причине приведенный ниже список основных характеристик оборудования имеет смысл рассматривать как набор технических требований к исполняемым на этом оборудовании технологическим операциям. По этой же причине нижеприведенный список может оказаться избыточным.

Такие обозначенные ниже параметры, как производительность, средняя производственная наработка на отказ, среднее время восстановления, стоимость материалов в расчете на одну пластину, среднее количество обработанных пластин между перерывами и некоторые другие, являются оптимальными при создании стандартного полупроводникового производства с уровнем технологии 90 нм и могут не браться в расчет при разработке конфигурации средств оснащения мелкосерийного производства со специфическими задачами. Для подобных случаев такие требования должны быть разработаны отдельно, исходя из планируемых характеристик создаваемого производства (**несмотря на то, что подавляющее большинство промышленного оборудования, имеющегося на рынке, соответствует как раз приведенным ниже характеристикам**).

В приведенном ниже перечне также не отражены такие пока еще «экзотические» для большей части имеющихся на данный момент в мире стандартных производственных линий установки, как **электронно-лучевые литографы, литографические системы с применением наноимпринта или установки ионно-лучевой коррекции** топологии готовых микросхем или схем-полуфабрикатов. Требования к таким видам оборудования и необходимость в них также должны быть определены при разработке конфигурации средств технологического оснащения создаваемой производственной линии, исходя из предъявляемых к ней задач.

5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

- **Наименование оборудования** – средство идентификации типа оборудования и конкретного его применения в процессе, ключевые процессные параметры, план контроля и др.;
- **Конструктивные характеристики оборудования** – средство идентификации ожидаемых от оборудования конкретных свойств, например, размеры поля степпера-сканера, наличие электростатического держателя пластины, применяемого для вакуумных средств технологического оснащения, интеграция или кластеризация средств технологического оснащения и др.;
- **Допущения, используемые при оценке затратных/эксплуатационных характеристик** – допущения, используемые для вычисления затрат на использование средства технологического оснащения и оценки общей стоимости производства:
 - ❖ **Производительность (Throughput)** – грубая оценка производительности в пластинах в час, принимающая стопроцентно безотказную работу оборудования (непрерывная последовательная обработка без остановок, не подвергаемая влиянию простоев, настройки и др.). Для контрольно-измерительного оборудования производительность может быть оценена по плану выборочного контроля, если он установлен в таблице эксплуатационных характеристик оборудования;
 - ❖ **Оценка капитальных затрат на средство технологического оснащения** – оценка капитальных затрат на приобретение оборудования в долларах США, исключая доставку, стоимость запасных частей, входящих в комплект поставки, и налоги;
 - ❖ **Средняя производственная наработка на отказ** – среднее значение эффективного времени работы до отказа, рассматриваемое как функция времени обработки, а не календарного времени. Соответствует стандарту **SEMI E10**;
 - ❖ **Среднее время восстановления** – определяется при проведении квалификационных испытаний. Соответствует стандарту **SEMI E10**;
 - ❖ **Среднее количество обработанных пластин между перерывами** – среднее количество пластин, обработанных до перерыва, рассматриваемое как функция количества обработанных пластин. Соответствует стандарту **SEMI E10**;
 - ❖ **Профилактическое обслуживание** – перечень заранее планируемых периодов времени, когда оборудование находится в неработоспособном состоянии, как среднее

количество часов в неделю. Соответствует стандарту **SEMI E10**;

- ❖ **Затраты на расходные материалы** – затраты на расходные процессные материалы на один проход пластины через оборудование (например, газов, химических реагентов, электрической энергии) и механических элементов (составных частей средства технологического оснащения или относящихся к нему элементов, заменяемых в штатном порядке, таком как текущее профилактическое обслуживание, например, мишеней, экранов, электродов, фильтров, уплотнительных колец, смазочных материалов);
- ❖ **Площадь, занимаемая средством технологического оснащения** – прямоугольная проекция средства технологического оснащения и его вспомогательных элементов на пол технологической зоны (чистого помещения). Это понятие не включает насосы, источники питания и др., которые могут быть установлены вне области технологической зоны. Область для вспомогательных сборочных единиц средства технологического оснащения входит во вспомогательную площадь средства технологического оснащения (см. ниже);
- ❖ **Вспомогательная площадь средства технологического оснащения** – прямоугольная проекция тех составных частей средства технологического оснащения, которые могут быть размещены в отдалении от него. Область на других уровнях производственного предприятия, занимаемая вспомогательным оборудованием, должна быть менее прямоугольной проекции средства технологического оснащения на пол чистого помещения. Это понятие не включает в себя зону обеспечения доступа к средству технологического оснащения;
- ❖ **Краевая зона** – область у края пластины, которая не подвергается равномерной достоверно проведенной обработке и не обеспечит формирование полной электрической схемы (принято значение 3 мм от края пластины);
- **Расчетное значение производительности на основе затрат на использование** – производительность, рассчитанная с использованием Wright, Williams & Kelly Cost of Ownership "Two Cool" Laminator, Wafer Fab Version 2.1.2:
 - ❖ **Целевое значение затрат на использование** – затраты на использование, рассчитанные без учета точечных дефектов (в предположении нулевого количества дефектов, возникших из-за «включенных в пленку» частиц) для проведения анализа чувствительности средства технологического оснащения по параметру «затраты на использование»;

- ❖ **Коэффициент производственного использования** – доля часов в неделю, когда средство технологического оснащения не подвергаются никакому обслуживанию или производственным испытаниям, притом, что количество изготовленных тестовых пластин принимают равным нулю;
- **Привнесенная дефектность** – загрязненность частицами пластины (или приобретенная «за один проход» пластины), представленная для оборудования процесса в единицах количества частиц «включенных в пленку» или «внутри одной группы» на квадратный сантиметр «за один проход» пластины;
- **Процесс** – в данном случае, некий характерный процесс, выявляющий ключевые процессные характеристики для каждого средства технологического оснащения, используемый для получения затратных эксплуатационных параметров средства технологического оснащения;
- **Данные, подлежащие сбору и измерению** – этими характерными признаками оборудования дополняют процессный раздел. Реальные эксплуатационные характеристики, единицы измерения, критерии/методики испытаний и др. для этих признаков (а, возможно, и других) должны быть определены в процессе планирования демонстрации эксплуатационных характеристик технологического оборудования.

5.2. ЛИТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

**ЭТО ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР ДОКУМЕНТА.
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛНОЙ ВЕРСИИ СВЯЖИТЕСЬ С
ФГУП «ВО «ВНЕШТЕХНИКА»**

5.3. ОБОРУДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

**ЭТО ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР ДОКУМЕНТА.
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛНОЙ ВЕРСИИ СВЯЖИТЕСЬ С
ФГУП «ВО «ВНЕШТЕХНИКА»**

5.4. ОБОРУДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**ЭТО ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР ДОКУМЕНТА.
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛНОЙ ВЕРСИИ СВЯЖИТЕСЬ С
ФГУП «ВО «ВНЕШТЕХНИКА»**

5.5. ОБОРУДОВАНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

**ЭТО ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР ДОКУМЕНТА.
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛНОЙ ВЕРСИИ СВЯЖИТЕСЬ С
ФГУП «ВО «ВНЕШТЕХНИКА»**

5.6. ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ

**ЭТО ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР ДОКУМЕНТА.
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛНОЙ ВЕРСИИ СВЯЖИТЕСЬ С
ФГУП «ВО «ВНЕШТЕХНИКА»**

5.7. ОБОРУДОВАНИЕ НАНЕСЕНИЯ СЛОЕВ

**ЭТО ДЕМОСТРАЦИОННЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР ДОКУМЕНТА.
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛНОЙ ВЕРСИИ СВЯЖИТЕСЬ С
ФГУП «ВО «ВНЕШТЕХНИКА»**

5.8. ОБОРУДОВАНИЕ ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЛАНАРИЗАЦИИ

**ЭТО ДЕМОСТРАЦИОННЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР ДОКУМЕНТА.
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛНОЙ ВЕРСИИ СВЯЖИТЕСЬ С
ФГУП «ВО «ВНЕШТЕХНИКА»**

5.9. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

**ЭТО ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР ДОКУМЕНТА.
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛНОЙ ВЕРСИИ СВЯЖИТЕСЬ С
ФГУП «ВО «ВНЕШТЕХНИКА»**

6. ССЫЛКИ

1. Цимбалов А.С. Исследование и разработка конструктивно-технологических решений создания транзисторного модуля для изготовления КМОП схем с проектными нормами 0,35 мкм на кластерном технологическом оборудовании// Дисс. канд. техн. наук, М. МИЭТ, 2006;
2. A 90-nm Logic Technology Featuring Strained-Silicon//IEEE Trans. On Electron Devices, v.51, NO.11, November 2004, pp.1790-1797.