

# Модуль 7

---

ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА ЭТАПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И  
РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ И СПЕЦИФИКАЦИЙ К ЯДРУ  
СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ

# Содержание модуля 7

7.1. Проведение анализа базовой информации (техническое задание, спецификации, технические требования по проекту) для проектирования фотошаблонов заданного технологического уровня

7.2. Определение возможности наличия критических слоев в комплекте фотошаблонов для заданного технологического уровня

7.3. Формирование специфических требований к литографии для всех критических слоев заданного технологического уровня

7.4. Разработка детального описания этапов маршрута проектирования для каждого технологического слоя, включая разделение технологических слоев на группы (простая технологическая коррекция, коррекция эффектов оптической близости на основе эмпирических правил и на основе моделей)

## Содержание модуля 7

7.5. Формирование служебной технологической информации, состоящей из знаков базирования установки фотолитографии, маркировки фотошаблонов, штрих-кода и других элементов, необходимых для технологического оборудования

7.6. Разработка требований к рамке виртуального прототипа фотошаблона, содержащей служебную технологическую информацию, рекомендаций по оптимальному размещению топологии кристаллов в заданной области (рамки виртуального прототипа фотошаблона)

7.7. Определение требований к программно-аппаратному комплексу проектирования фотошаблонов в соответствии с выбранным набором компонентов и опций специализированных программных платформ

## 7.1. Проведение анализа базовой информации (техническое задание, спецификации, технические требования по проекту) для проектирования фотошаблонов заданного технологического уровня

Первым этапом процесса изготовления фотошаблона является получение входных данных и их анализ на возможность изготовления на технологическом оборудовании.

На данном этапе происходит проверка ключевых параметров топологии (тональность, критичные элементы, габаритные размеры поля фотошаблона, координаты центра, наличие маркировки, метки совмещения, метки для проекционной литографии) на соответствие ТЗ и правилам проектирования.

Последовательность анализа первичных данных представлена на Рисунке 7.1.

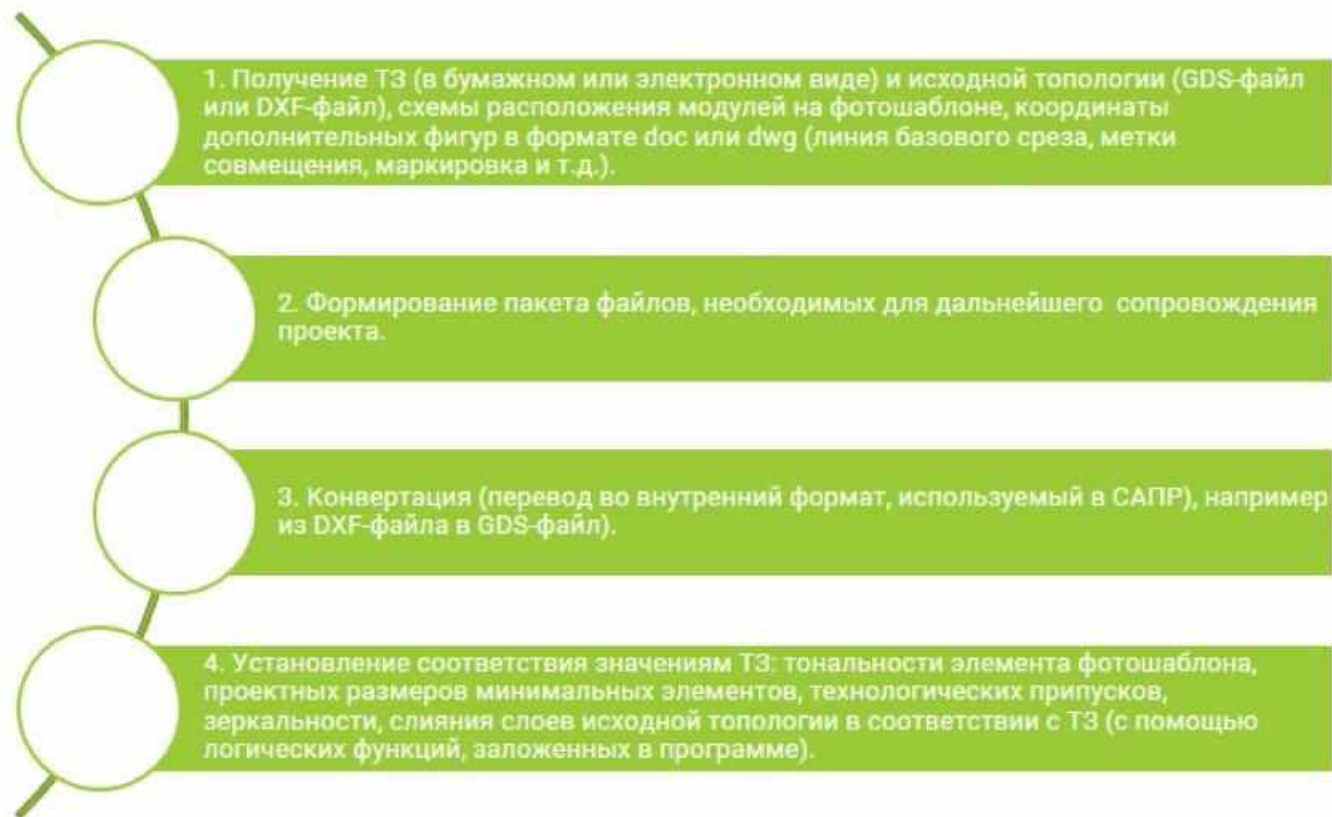


Рисунок 7.1 – Последовательность анализа первичных данных



## 7.2. Определение возможности наличия критических слоев в комплекте фотошаблонов для заданного технологического уровня

Следующим этапом является определение возможности наличия критических слоев в комплекте фотошаблонов для заданного технологического уровня.

Фотолитография, являясь на сегодняшний день одной из наиболее часто и широко используемых в микроэлектронике операций, открывает широкие возможности для получения защитных масок с элементами нанометрового размера и в то же время представляет собой один из наиболее сложных процессов в производстве микроэлектронных компонентов.

Задача литографии – обеспечить качественное формирование топологических решений на всем поле кремниевой пластины с соблюдением допускаемых отклонений размеров элементов и их расположения относительно нижележащих структур, сформированных в предыдущем цикле.

Такие параметры необходимо определить до выполнения конкретного технологического процесса, а затем поддерживать их значения в заданных пределах на протяжении производства как минимум партии выпускаемых изделий или серии.

Это величина энергии, получаемая фоторезистом (экспозиция) и вертикальное положение экспонируемого участка пластины в диапазоне фокусировки проекционного объектива (фокусировка).

Данные параметры непосредственно влияют на минимальный размер формируемых полупроводниковых структур, который называется критическим размером (**Critical Dimension** – CD).

---

Получение информации об изменении критических размеров элементов полупроводниковых структур - одна из основных задач в фотолитографии.

С точки зрения проектирования, характеристики микросхем зависят от точности изготовления критических размеров элементов и задача фотолитографии – обеспечить качественное формирование этих элементов на всем поле кремниевой пластины с соблюдением допускаемых отклонений размеров и их расположения относительно нижележащих структур, сформированных в предыдущем цикле.

В этом смысле контроль критических размеров решает задачу проверки геометрии сформированных структур на соответствие нормам проектирования.

С точки зрения технологического процесса формирования элемента на его размер существенное влияние оказывают величина энергии в его изображении пропорциональная световому потоку и времени его воздействия на светочувствительный материал и фокусировка этого изображения в слое фоторезиста.

Для обеспечения стабильной повторяемости заданных размеров критических элементов проводят серии экспериментов по определению оптимальных значений фокуса и дозы экспозиции степпера.

В результате определяется диапазон изменения этих параметров, в пределах которого размер критического элемента не выходит за рамки допуска.

Этот диапазон называется **технологическим окном** и является важной характеристикой фотолитографического процесса.



Технологическое окно процесса, полученное с помощью программы моделирования *SOLID-C* для процесса технологического уровня 0,25 мкм представлено на Рисунке 7.2.

В координатах «доза экспозиции–дефокусировка» на рисунке показаны две области: в одной изменение размера минимального элемента составляет не более 10% от номинального значения 0,25 мкм (синие линии), в другой – изменение угла наклона боковых стенок резистивной маски лежит в пределах 85–92 угл. град (желтые линии).

Прямоугольный участок – это и есть технологическое окно, которое показывает допустимые изменения дозы экспозиции и отклонений от точной фокусировки.

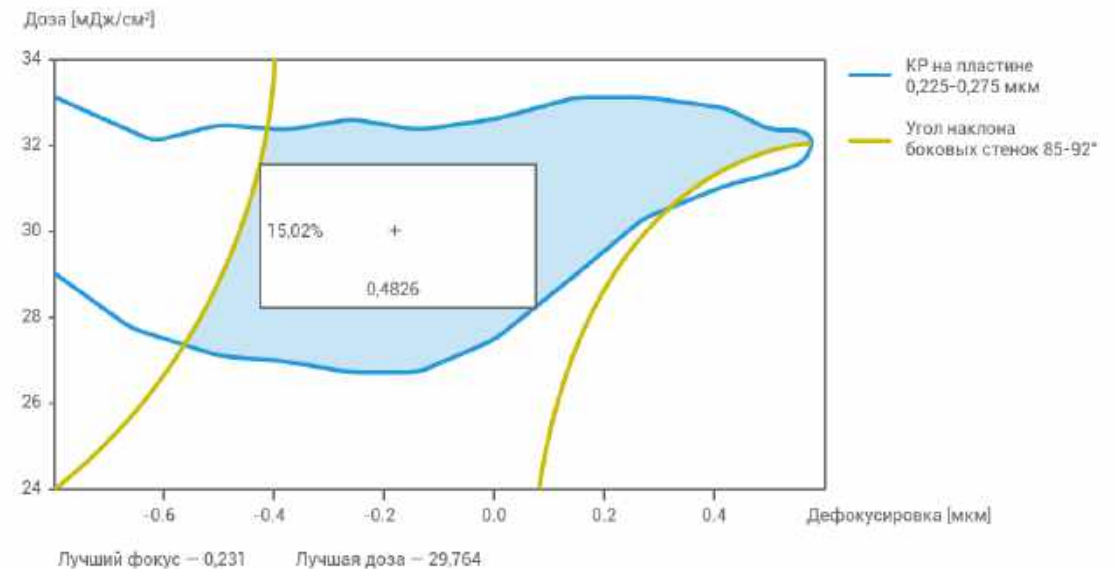


Рисунок 7.2 – Технологическое окно процесса

---

Очевидно, что ситуацию на Рисунке 7.2 можно исправить двумя путями: улучшив фокусировку или увеличив энергию экспозиции.

Однако сложность решения задачи определения параметров технологического окна усугубляется групповым методом формирования элементов. Это означает, что границы допуска на размеры элементов должны выполняться в пределах всего рабочего поля.

Реализация этих условий осложняется неравномерностью освещенности, неровностью пластины и кривизной поля объектива.

Суммарное действие двух последних факторов не должно превышать фотолитографическую глубину резкости объектива.

Для определения оптимальных значений фокуса и дозы экспозиции литографической установки с целью достижения стабильной повторяемости заданных размеров критических элементов сформированных на партии пластин с известной неровностью и в фоторезисте с известной чувствительностью проводят серии экспериментов, в которых исследуются изменения величины критических размеров элементов для ряда значений фокуса и дозы.

Полученный в результате анализа полученной информации диапазон изменения фокуса и дозы, в пределах которого размер критического элемента не выходит за рамки допуска, называется «технологическим окном» и является важной характеристикой фотолитографического процесса.



---

С продвижением в субмикронный диапазон становится важной трехмерность размеров элементов и к параметрам технологического окна добавляется угол наклона боковой стенки элемента.

Массивы данных, необходимых для определения параметров технологического окна, получают путем контроля критических размеров, сформированных в процессе эксперимента, на специализированном оборудовании, называемом установкой контроля критических размеров.

Следует отметить, что для этих исследований часто используют тестовый шаблон облегчающий задачу получения необходимых данных. В этом смысле контроль критических размеров сформированных в фоторезисте тестовых элементов решает задачу определения характеристик технологического процесса.

С возрастанием сложности и стоимости всего парка, используемых в фотолитографии оборудования и материалов проведение экспериментальных работ требует все больших материальных и временных затрат.

Поэтому современным инструментом исследования стало программное обеспечение моделирования процессов фотолитографии, которое анализирует совокупный вклад факторов, влияющих на трехмерную топографию критических элементов в слое фоторезиста.

---

Обладая исключительной гибкостью в части изменения параметров и условий процесса, моделирование позволяет проверить фотолитографическую пригодность топологии реальной маски, иначе программное обеспечение позволяет моделировать «печатаемость» в фоторезисте критических элементов топологии до начала дорогостоящей и требующей времени операции проекционного переноса ее изображения на полупроводниковую пластину.

Для этих целей разработаны программы Virtual Stepper, PROLITH или SOLID-C.

Благодаря фундаментальному физическому подходу моделирование позволяет определить и оптимизировать параметры фотолитографического оборудования, определить параметры технологического окна до этапа экспонирования пластины и моделировать трехмерную топографию элементов в фоторезисте на различных стадиях фотолитографической обработки.

В результате увеличивается выход годных приборов, и полностью используются возможности существующего технологического оборудования.



### 7.3. Формирование специфических требований к литографии для всех критических слоев заданного технологического уровня

Важнейшей характеристикой литографического процесса является его разрешающая способность. От разрешающей способности напрямую зависит минимальная толщина линии, которую можно нанести на фоторезисте.

Необходимо обеспечить соответствующее качество всех составляющих производственного цикла изготовления набора фотошаблонов – фотошаблонных заготовок, фоторезиста, химических компонентов для травления и проявления, оборудования генерации изображений, контроля критических размеров, однородности линейности, аттестации на дефектность и др.

С переходом к проектным нормам глубокого субмикрона (90 нм и менее) в конструировании ИС возникли принципиально новые проблемы, связанные, в основном, с тем, что топология современной интегральной схемы представляет собой сложную структуру, состоящую из десятков миллионов геометрических фигур.

Помимо трудностей технологического свойства (традиционная конструкция МОП-транзистора перестает работать из-за различных паразитных эффектов, проявляющихся в малоразмерных конструкциях) возникли проблемы, связанные с программно-аппаратным и методологическим обеспечением процесса проектирования. Дело в том, что с улучшением проектных норм микроэлектронных изделий возрастает стоимость подготовки производства и, соответственно, цена риска технической и идеологической ошибок.



---

Известно, что полупроводниковая промышленность занимает в рыночной мировой экономике уникальное положение, определяемое тем, что она развивается по детально разработанному плану, который, однако, не только не препятствует повышению конкурентоспособности участников, но даже способствует ему.

Этот план известен как *International Technology Roadmap for Semiconductors* (ITRS) и представляет собой план-прогноз, ежегодно обновляемый и публикуемый международной организацией Semiconductor Industry Association (SIA).

В основе ITRS лежит несколько простых принципов, в т.ч. закон Мура об удвоении числа элементов СБИС каждые 1,5–2 года.

Главное значение ITRS состоит в том, что этот документ не только прогнозирует динамику параметров, но и содержит точные указания относительно того, какими конструкторскими и технологическими средствами новые параметры могут быть достигнуты, когда и какие технические средства должны быть разработаны и освоены производством.

Таким образом, ITRS является руководством к действию не только для разработчиков приборов, но и для разработчиков техпроцессов и технологического оборудования.

Возрастающие требования к фотошаблонам для оптической литографии согласно этому нормативному документу приведены в Таблице 7.1-7.2.

Таблица 7.1 – Основные требования к фотошаблонам для оптической фотолитографии согласно ITRS

Годы производства	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Масштаб уменьшения изображения	4	4	4	4	4	4	4	4
Номинальный размер элемента на фотошаблоне (нм)	186	162	141	126	112	100	89	79
Минимальный размер элемента на фотошаблоне (нм)	130	114	99	88	78	70	62	55
Точность позиционирования (нм)	93	81	71	63	56	50	44	40
Однородность размеров на фотошаблоне	6,2	5,4	4,8	4,3	3,8	3,4	3,0	2,7
Линейность воспроизведения размеров	8,3	7,2	6,4	5,7	5,1	4,5	4,0	3,6
Допуск на критические размеры (нм)	4,1	3,6	3,2	2,9	2,5	2,3	2,0	1,8
Размер допустимого дефекта (нм)	41	36	32	29	25	23	20	18
Плоскостность поверхности фотошаблонной заготовки	190	165	147	131	117	104	93	83
Толщина пелликла	4,1	3,6	3,3	3,1	2,8	2,6	2,4	2,2
Объем исходных данных (Гб)	655	825	1040	1310	1651	2080	2621	3302
Сетка проектирования (нм)	2	1	1	1	1	1	1	1

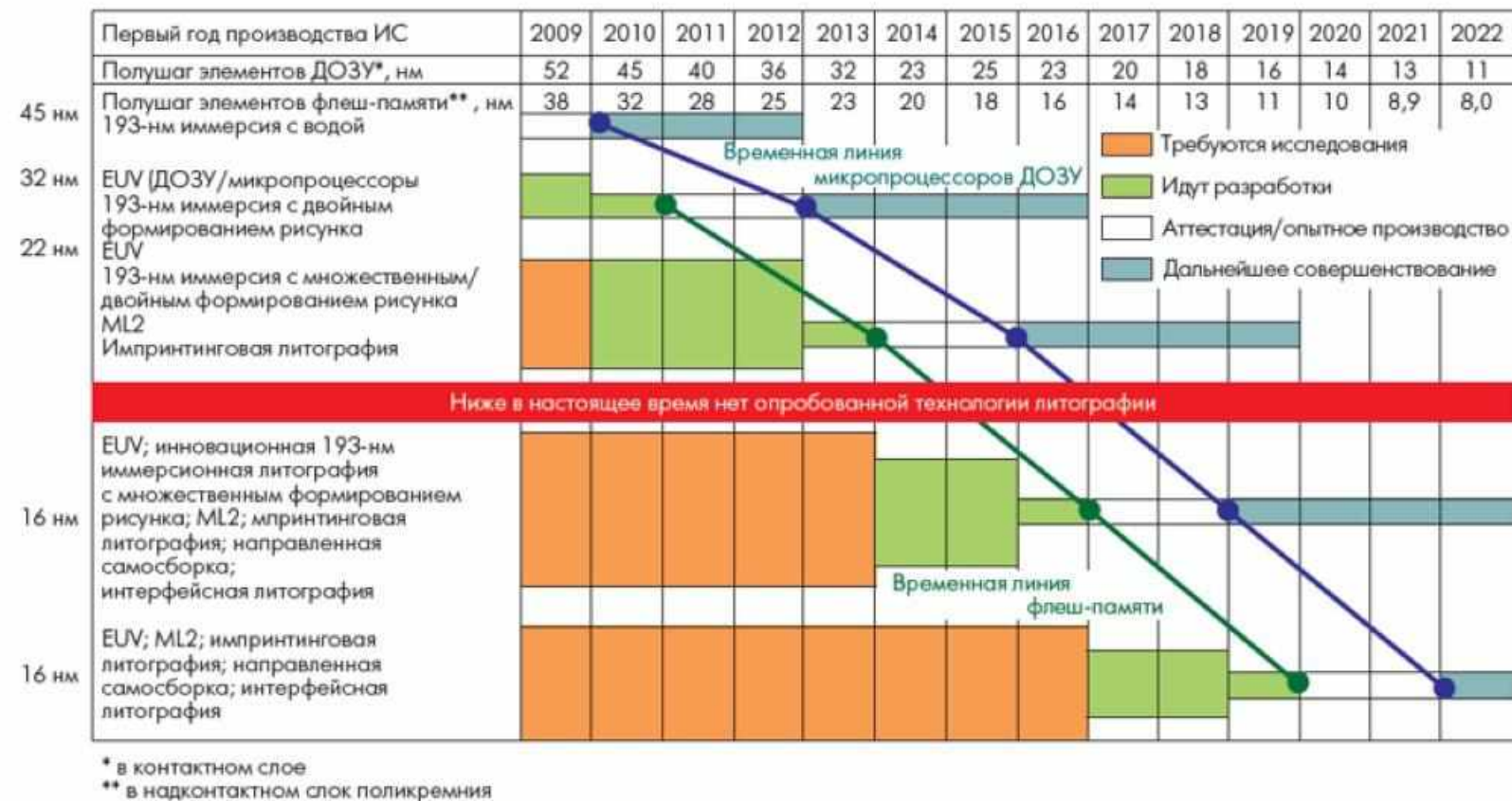


Таблица 7.2 – Динамика развития систем литографии



Соответственно, добиться максимального количества с каждой кремниевой пластины можно несколькими способами:

### 1. Увеличение размеров пластин (Рисунок 7.3)

Достоинства:

- на пластине помещается больше чипов;
- выше выход годных за счет уменьшения краевых паразитных эффектов и увеличения площади центральной части пластины - наименее дефектной.

Недостатки:

- высокая стоимость внедрения оборудования и обновления ПО

В настоящее время компании Intel, IBM и AMD производят пластины диаметром 450 мм.

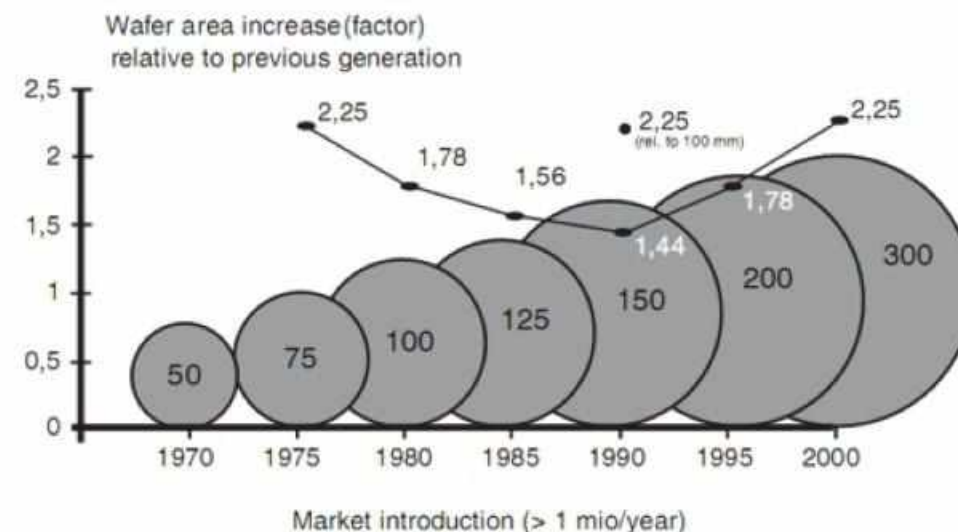


Рисунок 7.3 – Увеличение площади кремниевых пластин, связанный с совершенствованием технологий

## 2. Улучшение разрешения литографии (Рисунок 7.4)

Фотолитография успешно развивается более 40 лет, и с каждым десятилетием происходит уменьшение длины волны  $\lambda$ . Это достигается разработкой новых методов и техник повышения разрешающей способности:

- Изменение основных параметров оптической системы
- Переход на другие длины волн излучения
- Применение методов коррекции оптических искажений

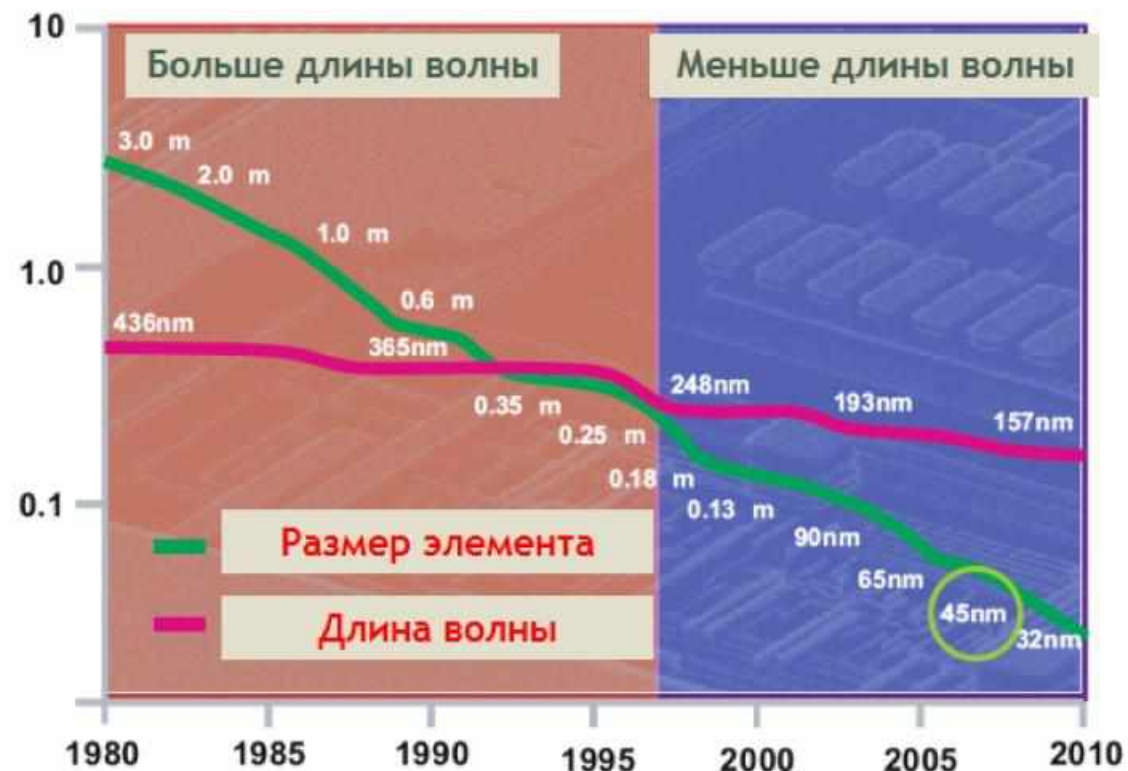


Рисунок 7.4 – Улучшение разрешения фотолитографии

#### 7.4. Разработка детального описания этапов маршрута проектирования для каждого технологического слоя, включая разделение технологических слоев на группы (простая технологическая коррекция, коррекция эффектов оптической близости на основе эмпирических правил и на основе моделей)

Маршрут подготовки данных включает: формирование рамки, определение массива кристаллов, размещение меток совмещения, тестовых кристаллов, маркировок.

Этапы типового маршрута проектирования фотошаблонов для технологических норм 0,35–0,18 мкм, 130–90 нм и 65–32 нм изображены на Рисунке 7.5.

Как правило, для проектных норм 0,35–0,18 мкм этап разработки и калибровки OPC-моделей не используется.

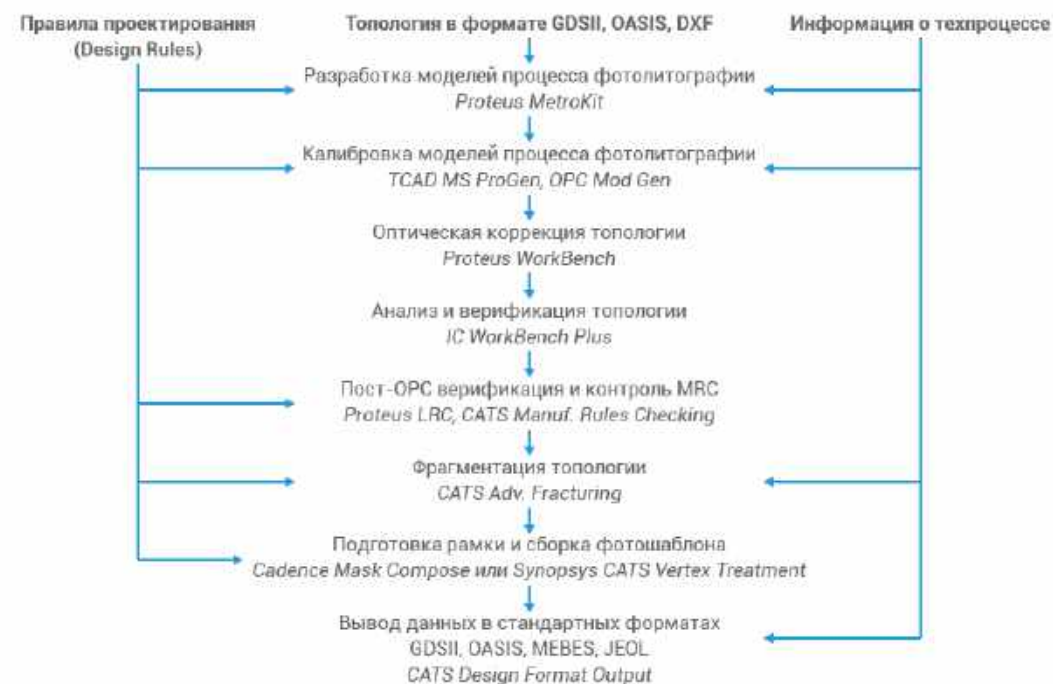


Рисунок 7.5 – Базовый маршрут проектирования фотошаблонов и подготовки управляющей информации для их изготовления



---

Каждый из этапов вышеуказанного маршрута при необходимости разбивается на подэтапы (их состав зависит от выбранного технологического уровня изготовления фотошаблонов) и для каждого из них составляются маршрутные карты, детально описывающие последовательность операций.

Некоторые этапы могут быть объединены в группы, объединенные по одному признаку (простая технологическая коррекция, коррекция эффектов оптической близости на основе эмпирических правил и на основе моделей и др.).

Это вызвано тем, что для каждого их этапов подготовки и обработки данных для изготовления фотошаблонов количество технологических операций, описываемых в маршрутных картах, может достигать нескольких сотен, и применение унифицированных и отработанных подходов позволяет снизить вероятность ошибки и общее время выполнения проекта.

При разработке детального описания каждого из этапов маршрута проектирования необходимо руководствоваться справочной и технической информацией, предоставляемой как изготовителем оборудования, так и требованиями ITRS.

## 7.6. Разработка требований к рамке виртуального прототипа фотошаблона, содержащей служебную технологическую информацию, рекомендаций по оптимальному размещению топологии кристаллов в заданной области (рамки виртуального прототипа фотошаблона)

Для выработки требований к рамке виртуального прототипа фотошаблона разработчик должен иметь следующую информацию:

- тип используемого фотошаблона, его характеристики;
- тип используемого пелликла (защитного покрытия рабочего поля фотошаблона);
- состав, характеристики и возможности используемого технологического и контрольно-измерительного оборудования;
- правила размещения элементов (меток) позиционирования и ориентирования для метрологического оборудования;

На Рисунке 7.6 показаны требования к размещению служебных элементов в рамке фотошаблона для степпера PAS5500 компании ASML.

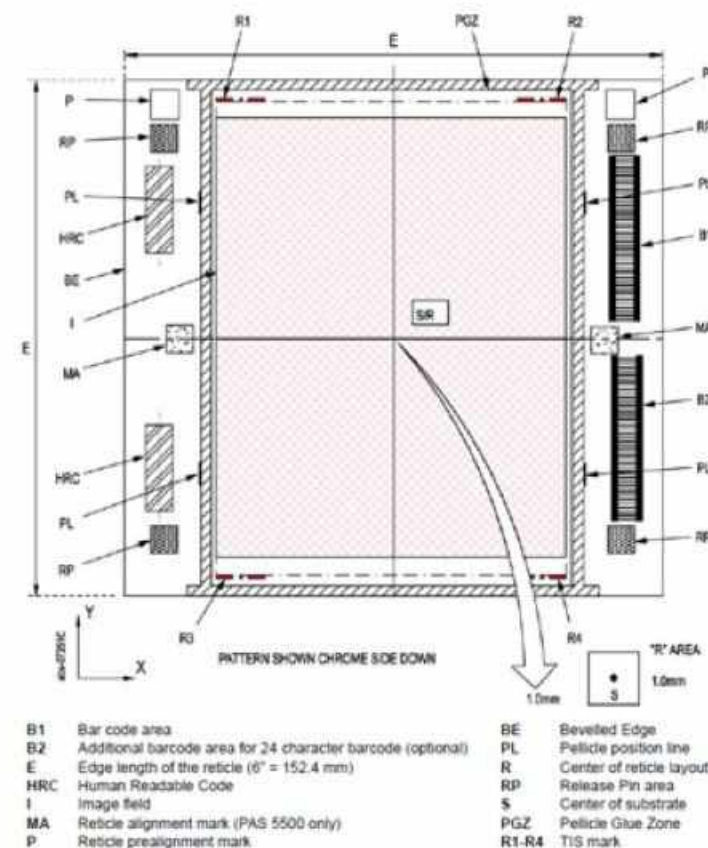


Рисунок 7.6 – Правила размещения служебных элементов в рамке фотошаблона для степпера PAS5500



Для разработки рекомендаций по оптимальному размещению топологии кристаллов в заданной области рамки виртуального прототипа фотошаблона разработчик должен иметь следующую информацию:

- технические требования заказчика по размещению элементов топологии;
- результаты моделирования изображения;
- метрологические результаты технологического оборудования;
- параметры калибровки технологических процессов
- внутренние требования по размещению тестовых топологических элементов (Рисунок 7.7).

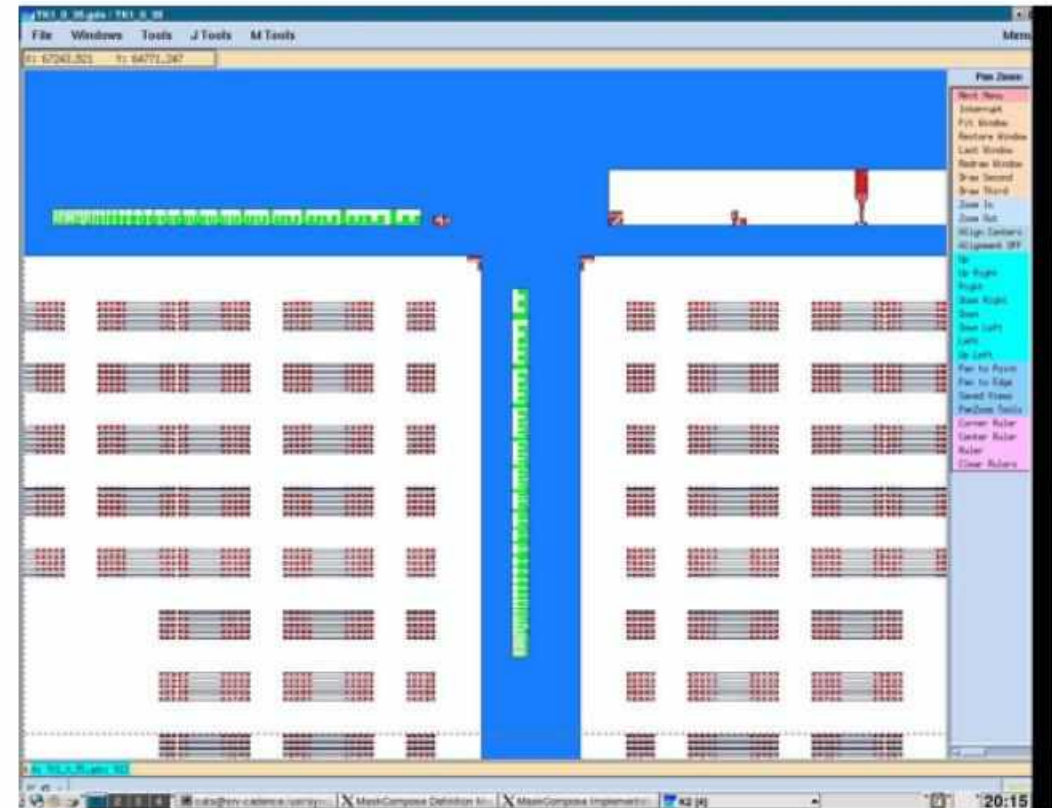


Рисунок 7.7 – Пример размещения тестовых структур в дорожках реза



## 7.7. Определение требований к программно-аппаратному комплексу проектирования фотошаблонов в соответствии с выбранным набором компонентов и опций специализированных программных платформ

Разработка маршрута проектирования и подготовки данных для производства фотошаблонов с учетом перехода на новые технологические уровни является сложным и дорогостоящим процессом.

Производство фотошаблонов всегда развивалось согласно текущим потребностям микроэлектронной промышленности: размеры – меньше, функциональность – больше, точность – выше.

Переход к новому технологическому уровню примерно через каждые 2–3 года открывает возможности постоянной модернизации электронной компонентной базы.

Однако при переходе в нанометровые уровни технологии ввиду достижения предела физических процессов, объем данных, описывающих топологию и элементы подавления оптических и дифракционных эффектов, достигает величин в сотни гигабайт (Рисунок 7.8).

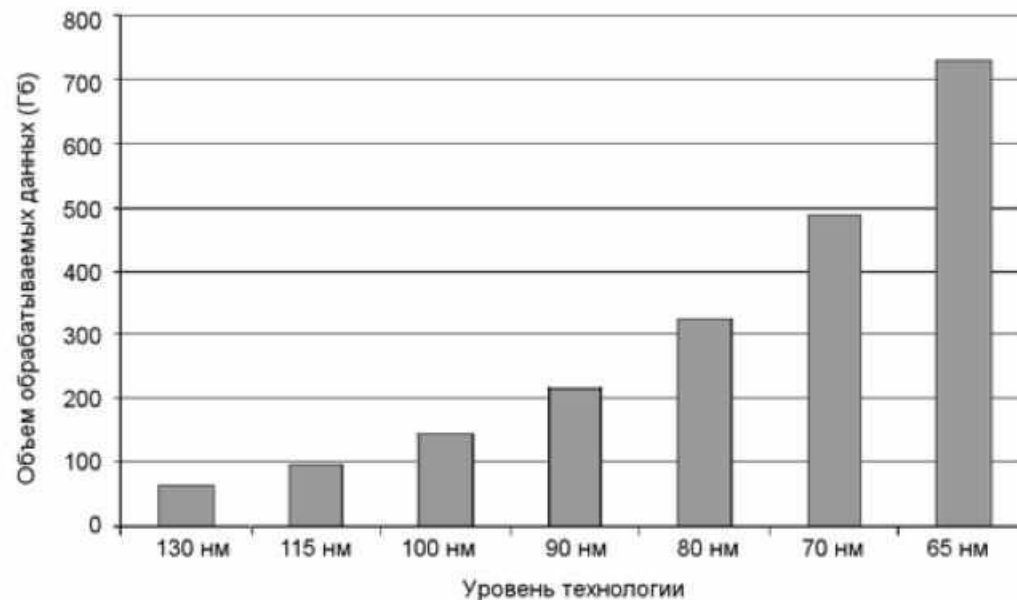


Рисунок 7.8 – Расчетные данные объема обрабатываемой информации при проектировании фотошаблонов для уровня технологии 130–65 нм

В результате появляется тенденция к объединению индивидуальных машин, установок и агрегатов в единые, управляемые сетью компьютеров технологические комплексы, которые в совокупности с персоналом и образуют так называемые технологические системы – кластеры, представляющие собой высокопроизводительные серверы, объединенные в закрытую вычислительную сеть (Рисунок 7.9).

Помимо кластерного подхода — увеличения количества вычислительных мощностей, есть еще один способ снижения времени выполнения MDP — это обработка данных путем распараллеливания процессов.

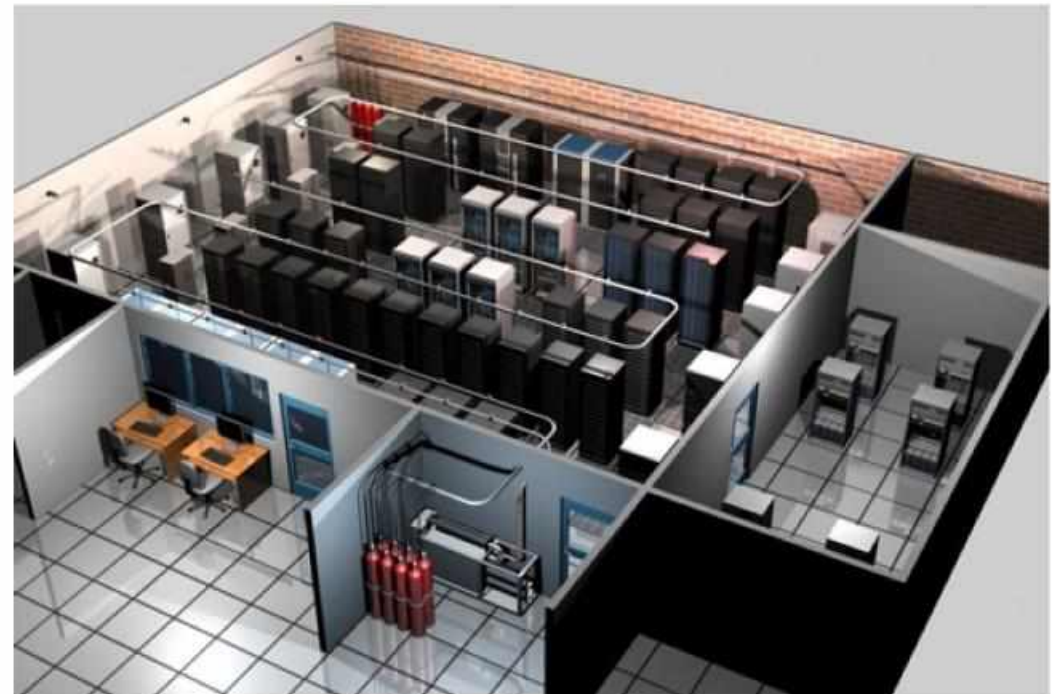


Рисунок 7.9 – Кластерный вычислительный комплекс

При выработке требований к программно-аппаратному комплексу проектирования фотошаблонов необходимо учесть не только большие объемы обрабатываемых данных, но и методологию их обработки - оптимизацию потоков данных.

Под оптимизацией понимается следующее.

Некоторые операции конвертации по своей сути быстрее, чем другие, к примеру, выполнение операций генерации и записи больших промежуточных файлов, а также некоторых логических операций, могут быть весьма затратными по использованию процессорного времени.

Каждый их этапов обработки данных осуществляется отдельно и последовательно, т.е. сначала операции OPC, потом операции LRC, затем операции MDP (Рисунок 7.10).

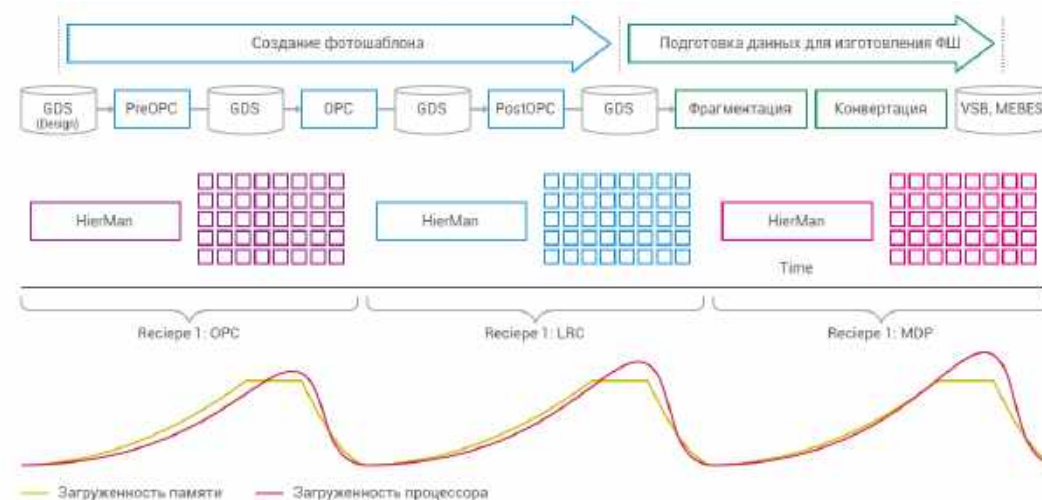


Рисунок 7.10 – Традиционный (линейный) метод обработки данных при дизайне фотошаблона



Любую из этих операций можно распараллелить на несколько процессоров (от 4 до 20), что несколько снизит общее время выполнения всего проекта.

Технология конвейерной обработки данных позволяет разбивать проект на фрагменты и производить параллельную обработку данных (Рисунок 7.11).

Поток обработки данных может быть настроен таким образом, что медленные операции начинают выполняться раньше, при этом общее время выполнения сокращается.

В некоторых случаях применение такой оптимизации позволяет сократить время обработки на 30-40%.

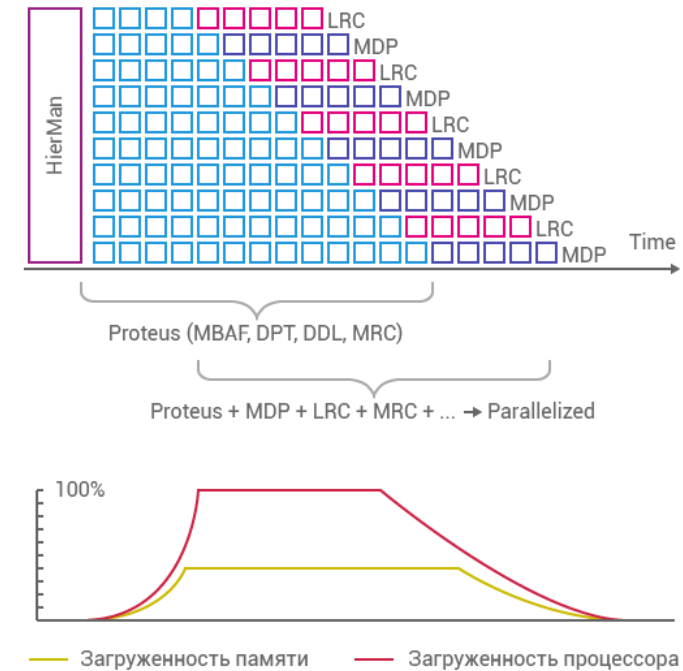


Рисунок 7.11 – Обработка данных при использовании конвейерного метода

Качественная технологическая подготовка к производству (*Design For Manufacturing – DFM*) позволяет получить хороший выход годных микросхем или быстрее выводить готовый продукт на рынок (Рисунок 7.12).

Объединение кластерного подхода и конвейерной обработки данных позволяет сократить общее время выполнения проекта до 50-70%.

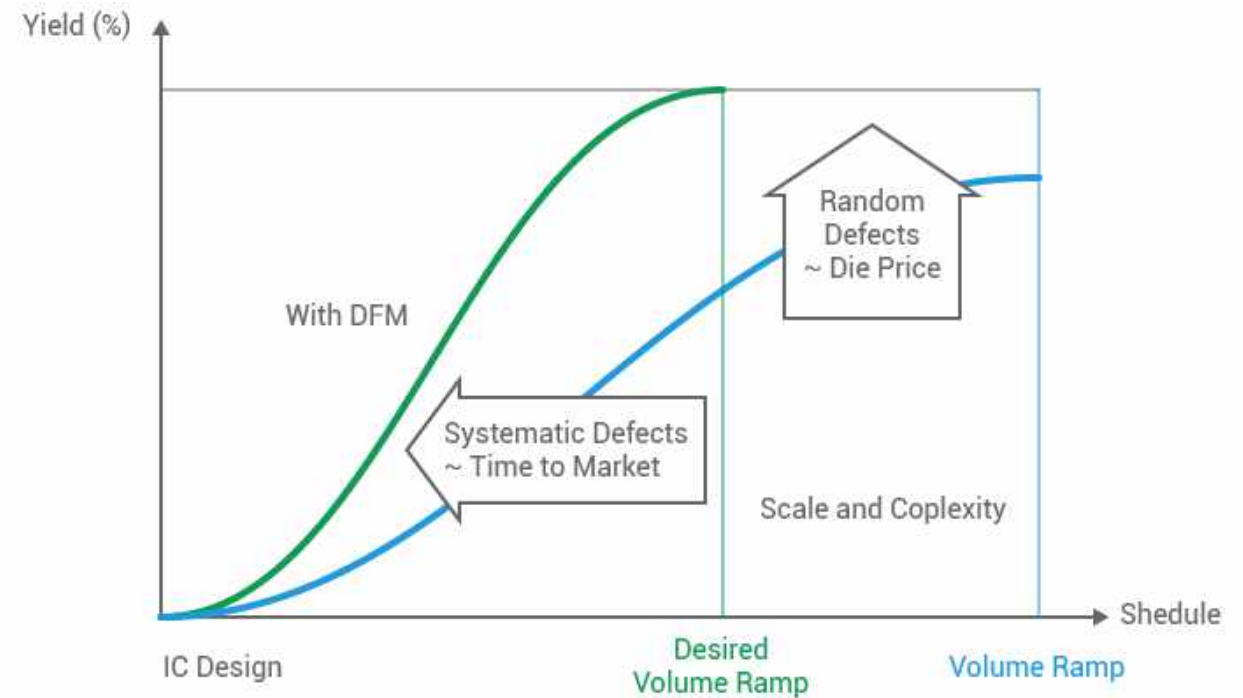


Рисунок 7.12 – Зависимость выхода годных от графика выпуска изделий