

# Модуль 5

---

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПА  
ФОТОШАБЛОНА

## Содержание модуля 5

- 5.1. Формирование служебных элементов фотошаблона, необходимых для производственного и контрольно-измерительного оборудования
- 5.2. Формирование виртуального прототипа фотошаблона (рамки, служебной информации) с определением координат всех служебных элементов
- 5.3. Размещение топологии кристалла и тестовых структур в рабочем поле фотошаблона согласно правилам проектирования и требованиям технологического оборудования
- 5.4. Объединение топологии кристалла и служебной информации в один файл, осуществляющий сборку фотошаблона
- 5.5. Проверка выходных данных на соответствие техническим и производственным нормам
- 5.6. Перевод данных в управляющую информацию для технологического оборудования

## 5.1. Формирование служебных элементов фотошаблона, необходимых для производственного и контрольно-измерительного оборудования

На фотошаблон наносится не только топологическая информация о чипе, но и значительная часть служебных данных – **технологические метки** (Рисунок 5.1).

Технологические метки предназначены для технологического оборудования (метки совмещения и мультипликации) и контрольно-измерительного оборудования (тестовые структуры, фигуры контроля размеров), а также для визуального контроля оператором (текстовая маркировка).

Технологические метки могут располагаться как в периферийной области фотошаблона (штрих-код, метки совмещения и мультипликации), так и в пространстве между чипами (die), например, тестовые структуры (для контроля качества изготовления фотошаблона).

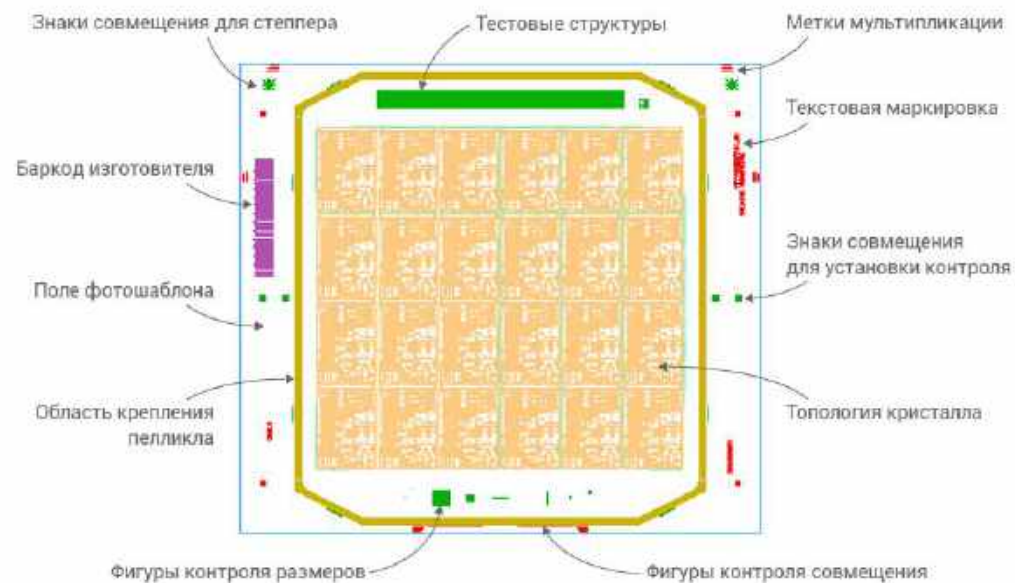


Рисунок. 5.1 – Проект фотошаблона со служебными элементами

В процессе изготовления кристалла ИС фотолитография повторяется многократно, и необходимо каждый раз осуществлять совмещение рисунков топологии ИС.

Под **совмещением** понимается точная ориентация фотошаблона относительно кремниевой пластины, при которой элементы очередного топологического слоя (на фотошаблоне) занимают положение относительно элементов предыдущего слоя (в пластине), предписанное разработчиком топологии.

Для совмещения используют сложные оптико- механические комплексы, позволяющие осуществлять совмещение визуально, вручную и автоматически. В первом случае сначала проводят совмещение визуально (так называемое грубое совмещение), а затем точное совмещение по реперным знакам (Рисунок 5.2) с точностью в пределах 1 мкм.

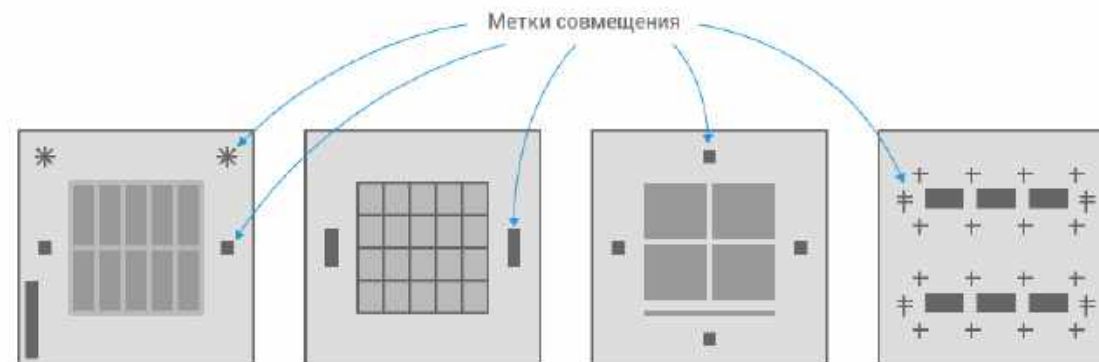


Рисунок 5.2 – Метки контроля совмещения слоев



Метки совмещения делаются на каждом слое (фотошаблоне).

Основное требование к совмещению слоев – это точность 25-40% от минимального размера элемента. В современной фотолитографии это составляет около 10-20 нм!

Для первичного совмещения используют реперные метки в виде простых геометрических элементов (Рисунок 5.3).

При каждой последующей операции реперные знаки, имеющиеся на используемом в данный момент фотошаблоне, совмещаются с реперными знаками на пластине.

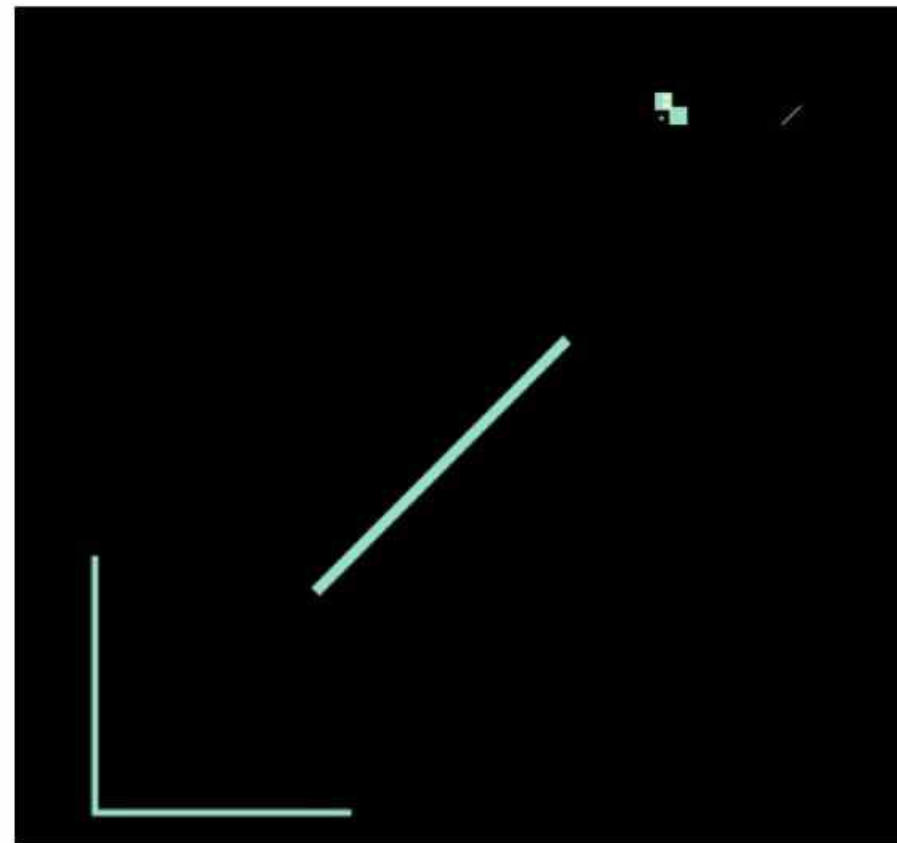


Рисунок 5.3 – Реперные знаки для позиционирования фотошаблона в степпере

При совмещении фотошаблон при помощи высокоточных приводов по осям x и y перемещается до тех пор, пока не произойдет наиболее точное наложение меток на фотошаблоне и на пластине (Рисунок 5.4).

Использование нескольких таких меток позволяет выявить неортогональность осей (Рисунок 5.5).

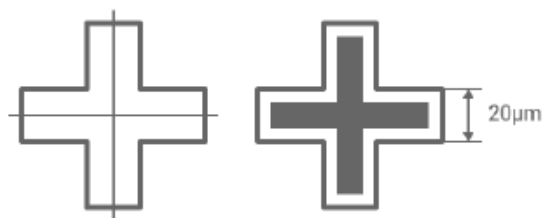


Рисунок 5.4 – Наложение контура на подложке и метки на фотошаблоне позволяет достичь точности совмещения в несколько нанометров

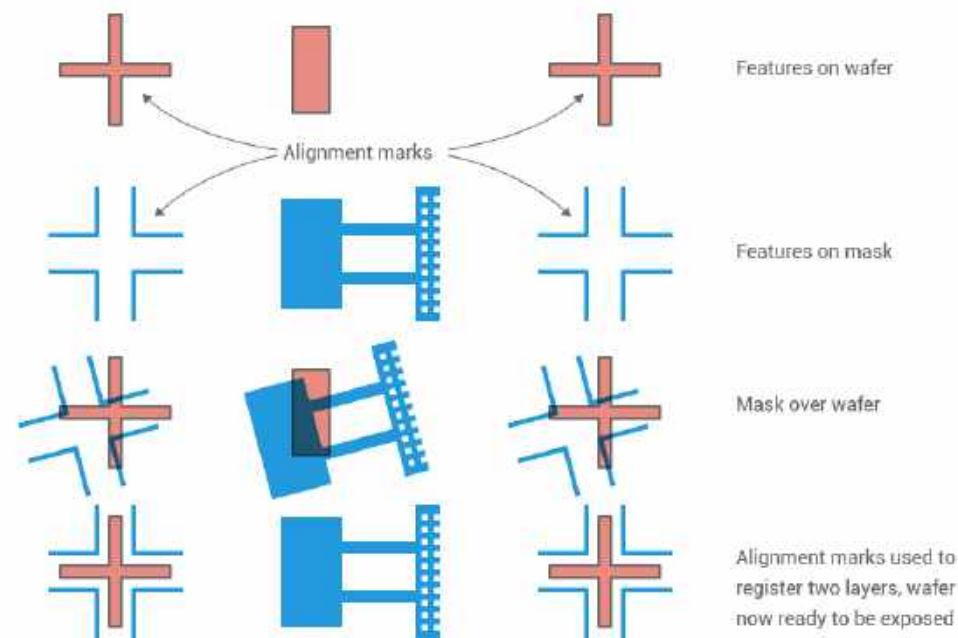


Рисунок 5.5 – Контроль совмещения реперных знаков при позиционировании фотошаблона в степпере

Для более точного совмещения используются метки в виде нониусов (шкала с линейными насечками), и муаровых рисунков (концентрические окружности с переменным шагом), см. Рисунок 5.6. Использование нониусов и муаровых рисунков позволяет выявить искажения рисунка, изменение увеличения (масштаба).

При разработке меток совмещения необходимо учитывать применяемые процессы переноса рисунка.

Типичная точность визуального совмещения – около 1 мкм, автоматизированного – десятки и единицы нанометров.

Принципы совмещения для контактной и проекционной литографии имеют свои особенности.

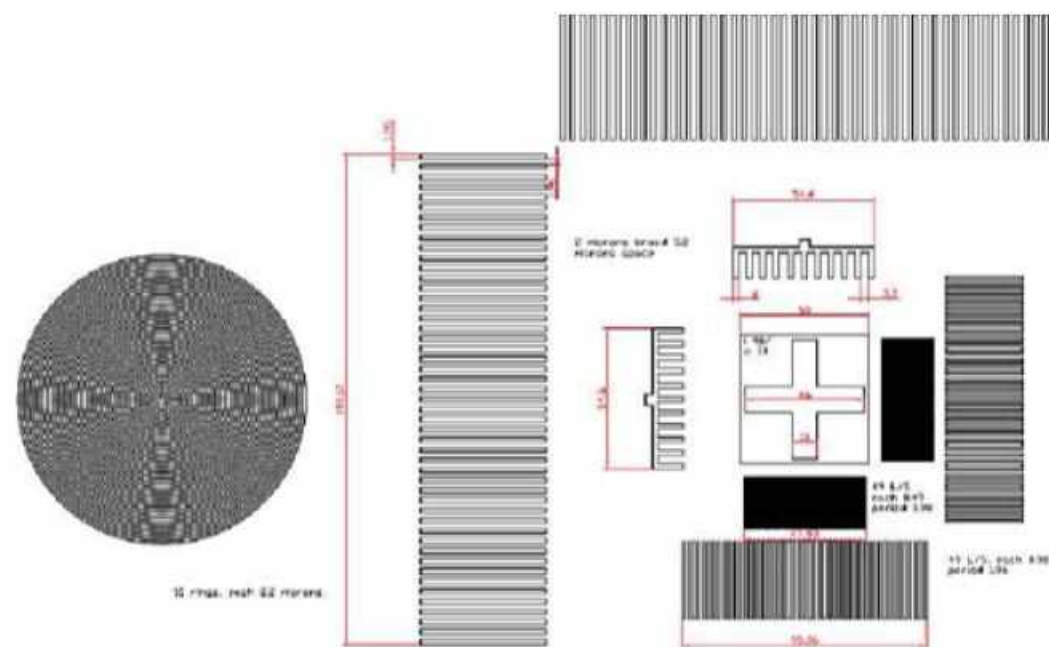


Рисунок 5.6 – Реперные знаки в виде муаровых рисунков (слева) и нониусов (справа) для точного позиционирования фотошаблона

Также для точного совмещения могут применяться специальные знаки совмещения с контролируемым зазором, которые входят в состав топологических рисунков соответствующих слоёв (Рисунок 5.7).

Совмещение считается выполненным, если при введении одного знака внутрь другого по всему контуру просматривается зазор, т.е. отсутствует перекрытие Рисунка.

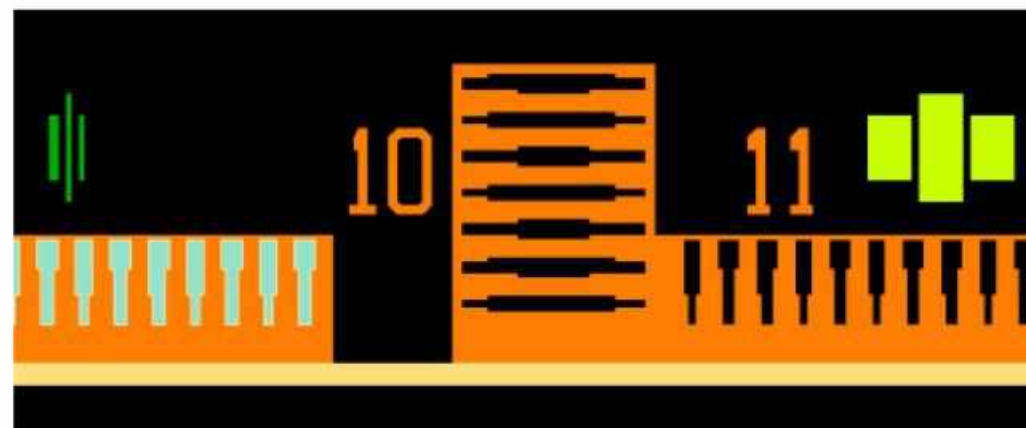


Рисунок 5.7 – Знаки совмещения с контролируемым зазором для точной юстировки



Знаки совмещения нужны не только для позиционирования фотошаблона, но и для установок автоматизированного контроля и измерений, которые по таким знакам находят контрольные точки (Рисунок 5.8).



Рисунок 5.8 (а) – Пример метки для ориентации установки контроля и измерений

Метки совмещения  
для установок контроля

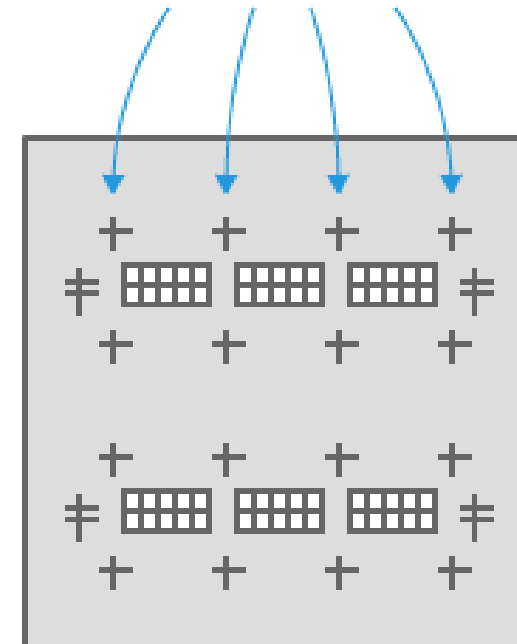


Рисунок 5.8 (б) – Размещение меток для установок контроля и измерения

Другим типом технологических меток являются тестовые фигуры контроля плотности рисунка, фигуры контроля разрешающей способности – по ним выставляется оптимальное фокусное расстояние, и др. (Рисунок 5.9-5.11).

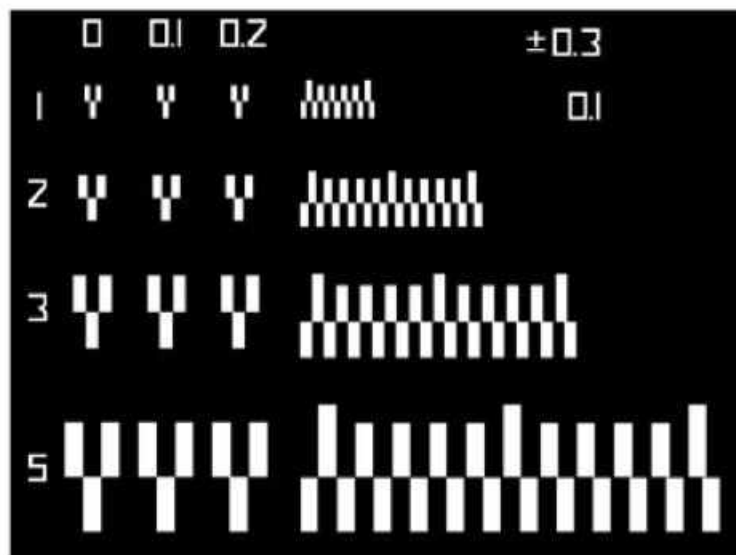


Рисунок 5.9(а) – Тестовые метки для определения плотности (разрешающей способности)

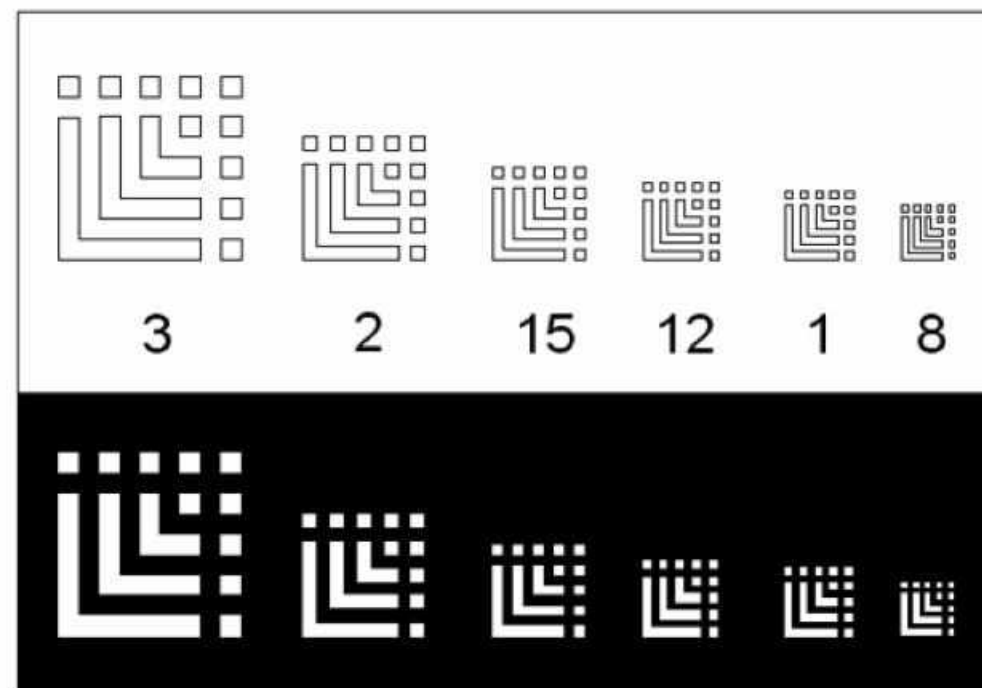


Рисунок 5.9(б) – Тестовые метки для определения плотности (разрешающей способности)

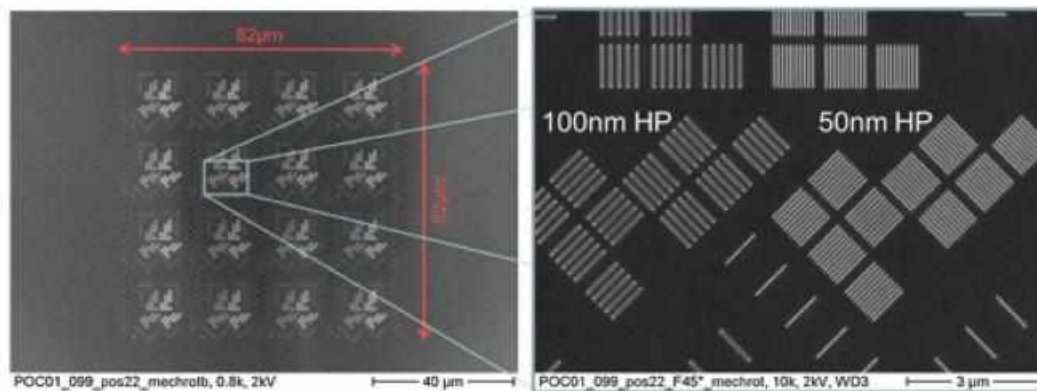


Рисунок 5.10 – Тестовые метки для настройки фокусного расстояния



Рисунок 5.11 – Пример текстовой метки и метки со штрих-кодом (баркод)

## 5.2. Формирование виртуального прототипа фотошаблона с определением координат всех служебных элементов

**Виртуальный прототип фотошаблона** – программная (цифровая) модель фотошаблона, предназначенная для визуального и технического контроля топологических элементов и расположения технологических меток.

Виртуальный прототип фотошаблона состоит из непосредственно топологии чипа, мультиплицированной (размноженной по площади фотошаблона) и **рамки фотошаблона** – набора технологических меток для конкретного оборудования и технологического процесса (Рисунок 5.12).

Также виртуальный прототип фотошаблона широко используется при моделировании параметров для оптимизации технологического процесса изготовления фотошаблона.

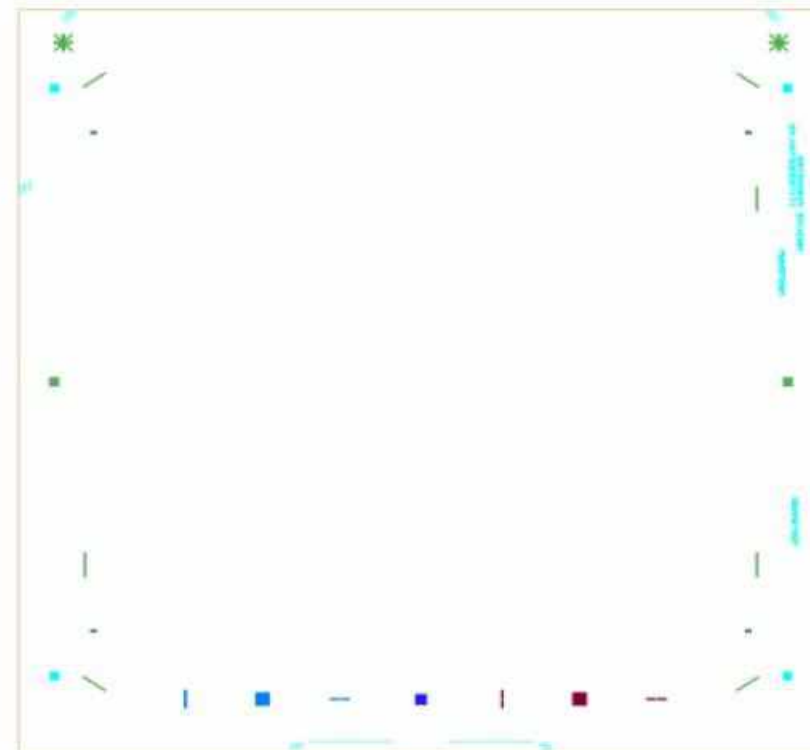


Рисунок 5.12 – Заготовка (рамка) фотошаблона с размещенными служебными элементами: метки контроля, совмещения, бар-код, текстовая маркировка.  
В центре – место для топологии и тестовых структур



Процесс синтеза тестовых структур и технологических меток, необходимых для производственного и контрольно-измерительного оборудования и размещения самой топологии на фотошаблоне называют *генерацией рамки (jobdeck)*.

На данном этапе проводится формирование заготовки фотошаблона (рамки, mask frame) с определением координат служебных элементов: рабочего поля, меток контроля, меток совмещения, баркода, текстовой маркировки и пр., создание (или выбор из имеющихся библиотек) и оптимальное размещение в рабочем поле фотошаблона чипов и тестовых структур.

На Рисунке 5.13 показан маршрут создания рамки для фотошаблона средствами *Cadence MaskCompose*.

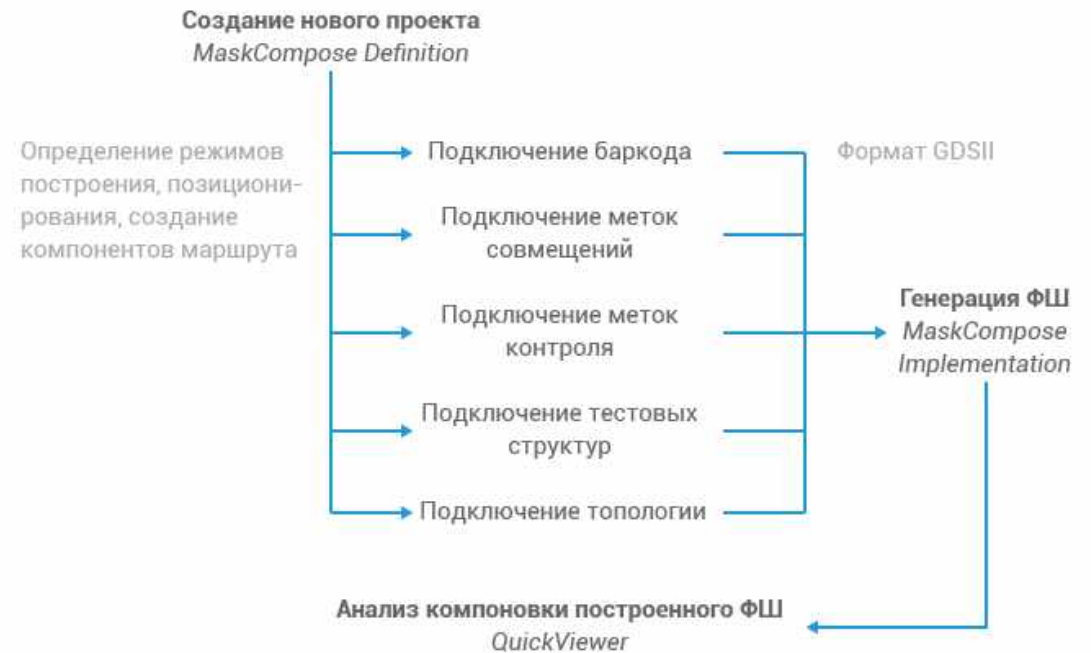


Рисунок 5.13 – Схема маршрута создания рамки для фотошаблона средствами *Cadence MaskCompose*

Средствами программного пакета *Cadence MaskCompose* создается рамка фотошаблона в формате *GDSII* или *OASIS* с периферийной областью, содержащей все служебные и технологические метки: границы размещения элементов, баркод, метки степпера, дорожки реза и другую информацию, необходимую для изготовления фотошаблона.

Этот процесс включает в себя генерацию топологической информации в формате *GDSII* или *OASIS* с заданным размером чипа, определения количества кристаллов, наиболее точно удовлетворяющего заданным условиям, размещение всех компонентов скрайба: меток совмещения, тестовых кристаллов, маркировок и т. д. (Рисунок 5.14-5.16).

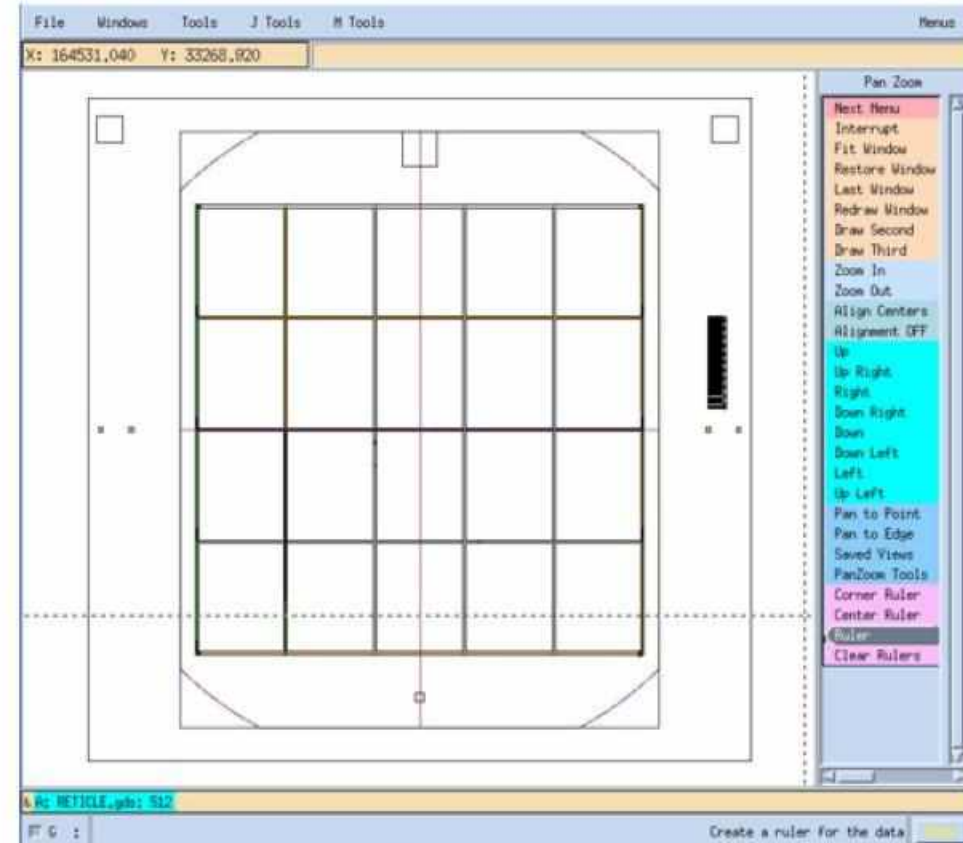
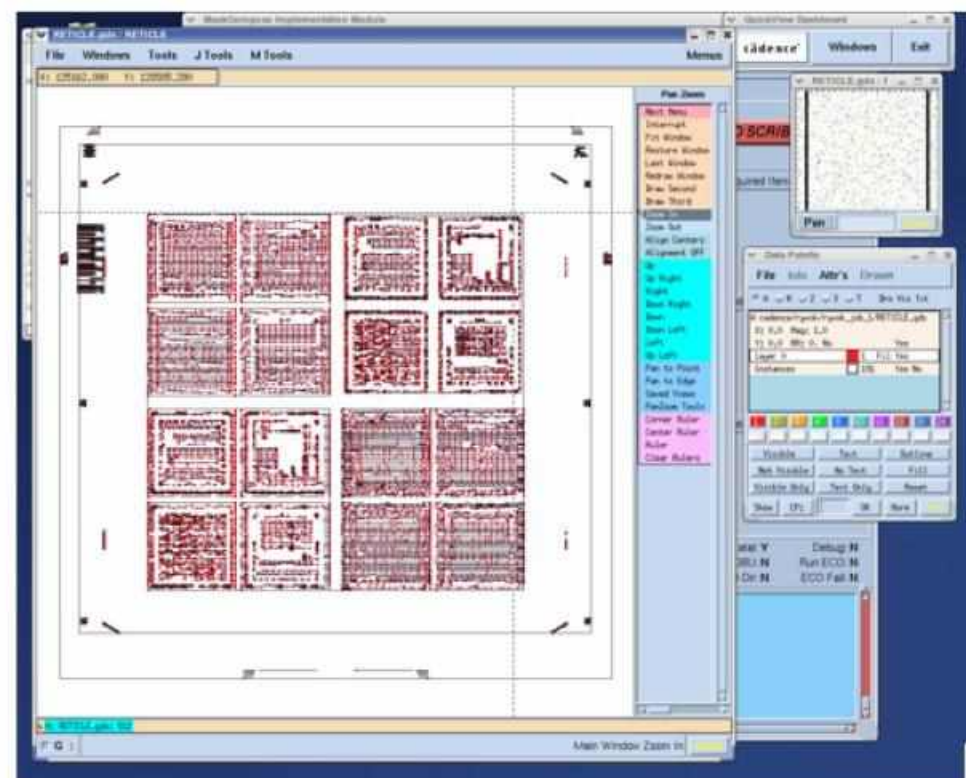
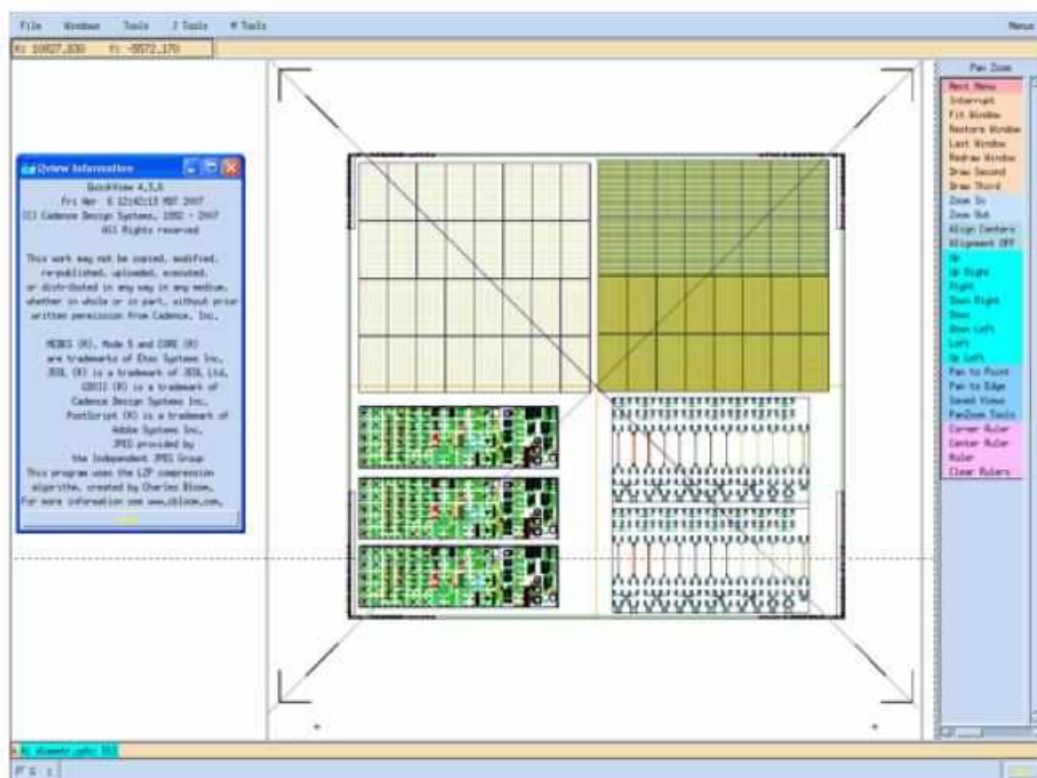


Рисунок 5.14 – Размещение (мультиплицирование) топологии в рабочем поле фотошаблона в *Cadence MaskCompose*





### 5.3. Размещение топологии кристалла и тестовых структур в рабочем поле фотошаблона согласно правилам проектирования и требованиям технологического оборудования

Рисунок на фотошаблоне не всегда уникальный. Часто топологию кристалла располагают на шаблоне более, чем один раз. Данный процесс называют **мультиплицированием**.

При мультиплицировании топология кристалла размещается в рабочем поле фотошаблона согласно правилам проектирования и требованиям технического задания от Заказчика.

Тестовые структуры, необходимые для контроля технологических процессов (подробнее об этом в разделе 9), обычно располагаются в дорожках реза (*Scribe*) между рабочими кристаллами (*Die*), хотя встречаются случаи их расположения на месте нескольких рабочих кристаллов на пластине, либо на периферии фотошаблона, в местах, свободных от технологических меток (Рисунок 5.17).

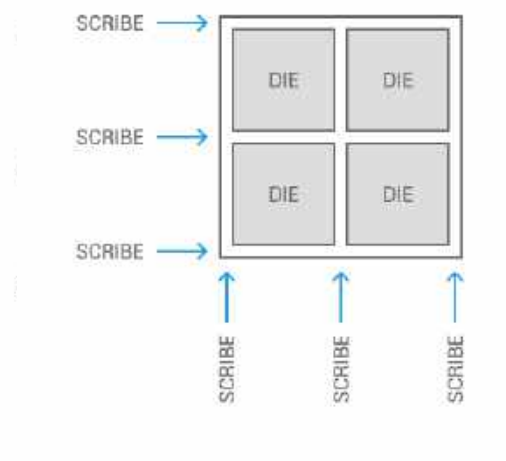


Рисунок. 5.17 – При мультиплицировании между блоками с топологией (*die*) остаются дорожки реза (*scribe*), в которых также могут быть размещены тестовые структуры



Технологические метки, предназначенные для литографического и контрольно-измерительного оборудования, размещаются строго в соответствии с технологической документацией на конкретный тип оборудования (Рисунок 5.18).

Прочая служебная информация (бар-код, текстовые метки и пр.) размещаются согласно внутренним регламентирующим документам производственного участка.

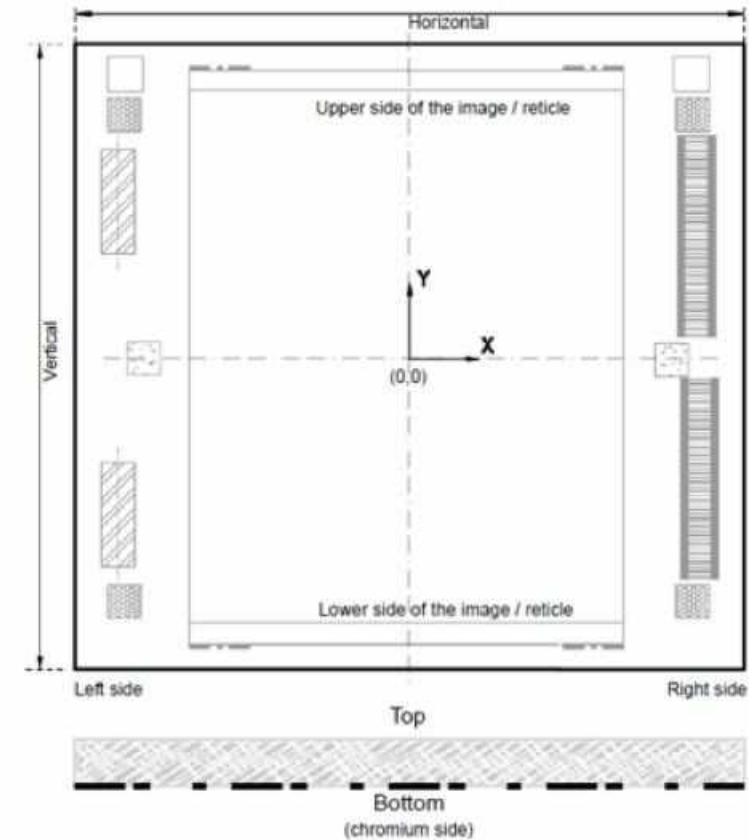


Рисунок 5.18 – Схема размещения технологических меток (фрагмент из техдокументации на степпер ASML PAS5500)

---

Общий алгоритм применения модулей программного обеспечения *MaskCompose* следующий:

1. Запуск модуля *MaskCompose Startup Module*. На этом этапе осуществляется определение используемых имен внешних файлов и процессов в маршруте построения фотошаблона.
2. Запуск модуля *MaskCompose Definition Module*. При выполнении данной операции происходит определение компонентов, процессов, правил для построения фотошаблона.
3. Запуск модуля *MaskCompose Implementation Module*. Данная операция предназначена для генерации фотошаблона с установленными размерами кристалла (заданных настроек и параметров в модуле Definition).
4. Запуск инструмента *K2\_QuickView*. Контрольная операция, при которой происходит отображение и анализ построенного фотошаблона.

Маршрут проектирования рамки в *Cadence MaskCompose* представляется графически в виде иерархического дерева.

Компоненты отображаются блоками на экране модуля *Definition*, который предназначен для для определения плана компоновки фотошаблона (формирование кадра изображения, дорожек реза, тестовых структур и т. д.) и размещения компонентов на шаблоне (Рисунок 5.19).

Компонентами могут быть: топология меток степпера, тестовых структур, баркод, элементы топологии кристаллов или необходимый промежуточный элемент, в котором устанавливаются режимы и правила для правильного построения фотошаблона.

Для каждого компонента пользователь задает размеры, режим построения и тип размещения компонентов (окна *Item Construction*, *Item Size* и *Item Placement*).

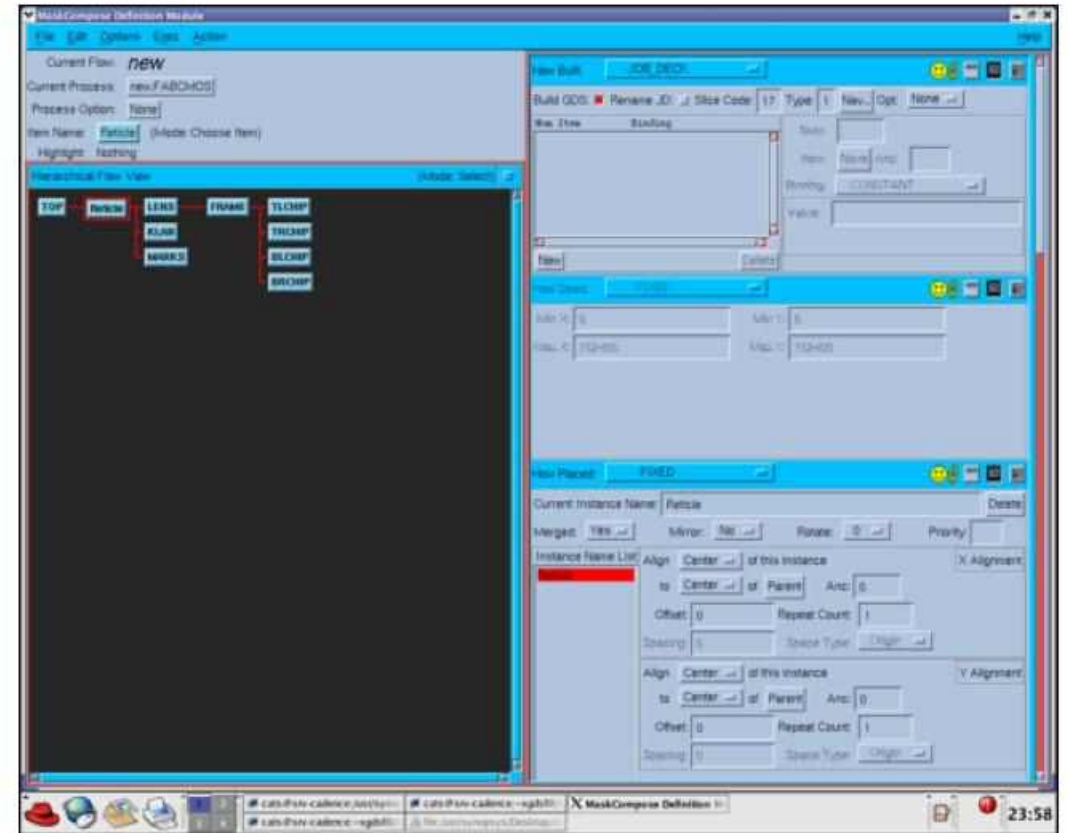


Рисунок 5.19 – Окно модуля *Definition* в *Cadence MaskCompose*

Маршруты в *MaskCompose* строятся на концепции Parent – Child (родительский элемент – дочерний элемент), которая предполагает иерархическую структуру маршрута.

Каждый маршрут начинается с компонента, названного TOP (первоначальный элемент, от которого будет строиться каждый маршрут), затем он может иметь компонент с именем RETICLE справа от TOP (Рисунок 5.20).

Это будет означать, что TOP основатель (parent) RETICLE, и что RETICLE – дочерний элемент (child) для TOP.

Если другой компонент был добавлен в маршрут на тот же самый уровень, что и RETICLE, и имя компонента было WAFER, тогда RETICLE и WAFER будут компонентами одного уровня.

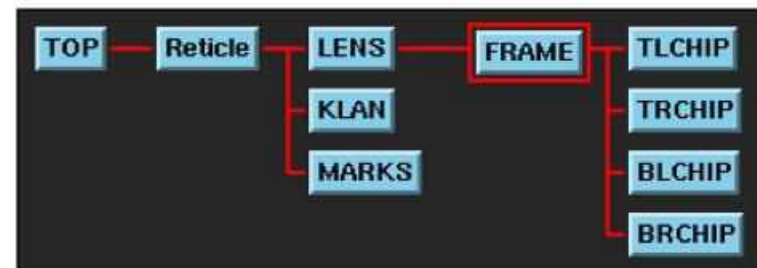


Рисунок 5.20 – Иерархическое представление маршрута компонентов для проектирования фотошаблона



Модуль *Automated Cluster Builder* предназначен для генерации кластер-файлов, несущих в себе информацию о размещении чипов с различными геометрическими габаритами и тестовых структур (Рисунок 5.21).

Интерфейс модуля состоит из меню: основной информации, алгоритмов размещения, окна визуализации, опций, глобальных параметров (габариты кадра изображения), списка размещаемых кристаллов.

Размещение служебной технологической информации (баркод, метки технологического оборудования, маркировки) происходит в соответствии с техническим заданием заказчика и ограничений на проект.

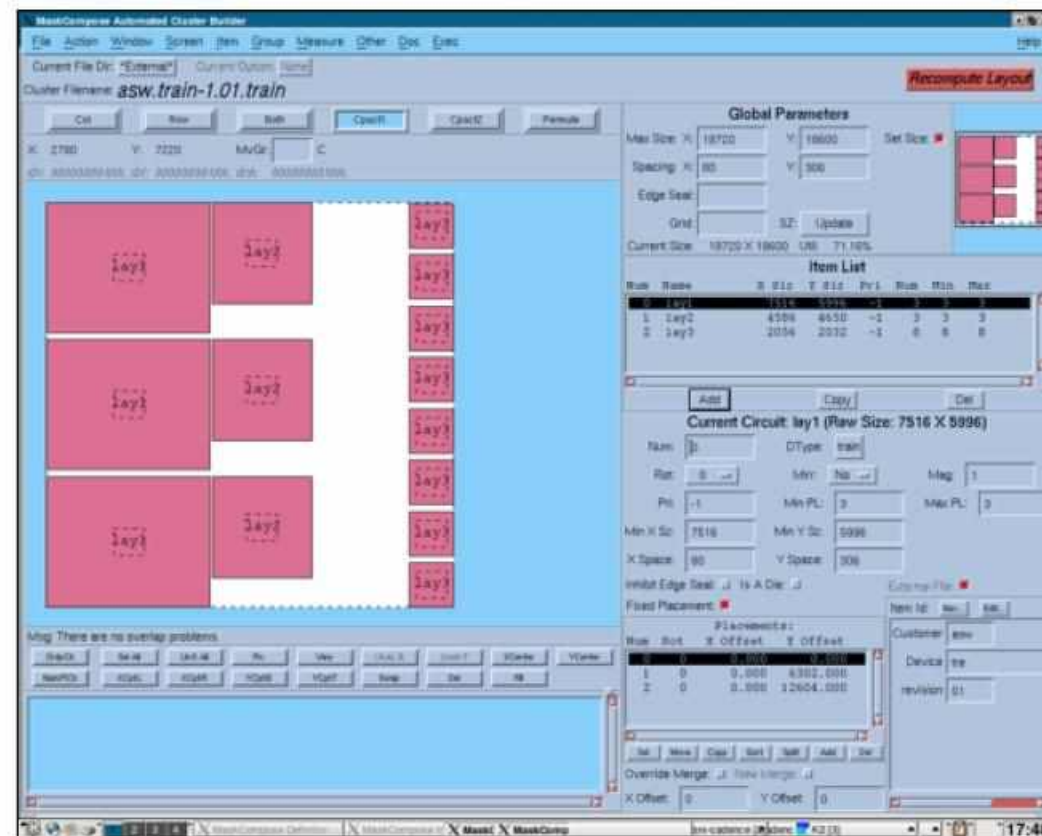


Рисунок 5.21 – Интерфейс модуля *Automated Cluster Builder* в *Cadence MaskComposer*

Модуль *Cadence QuickView* предназначен для отображения и анализа построенного фотошаблона (Рисунок 5.22).

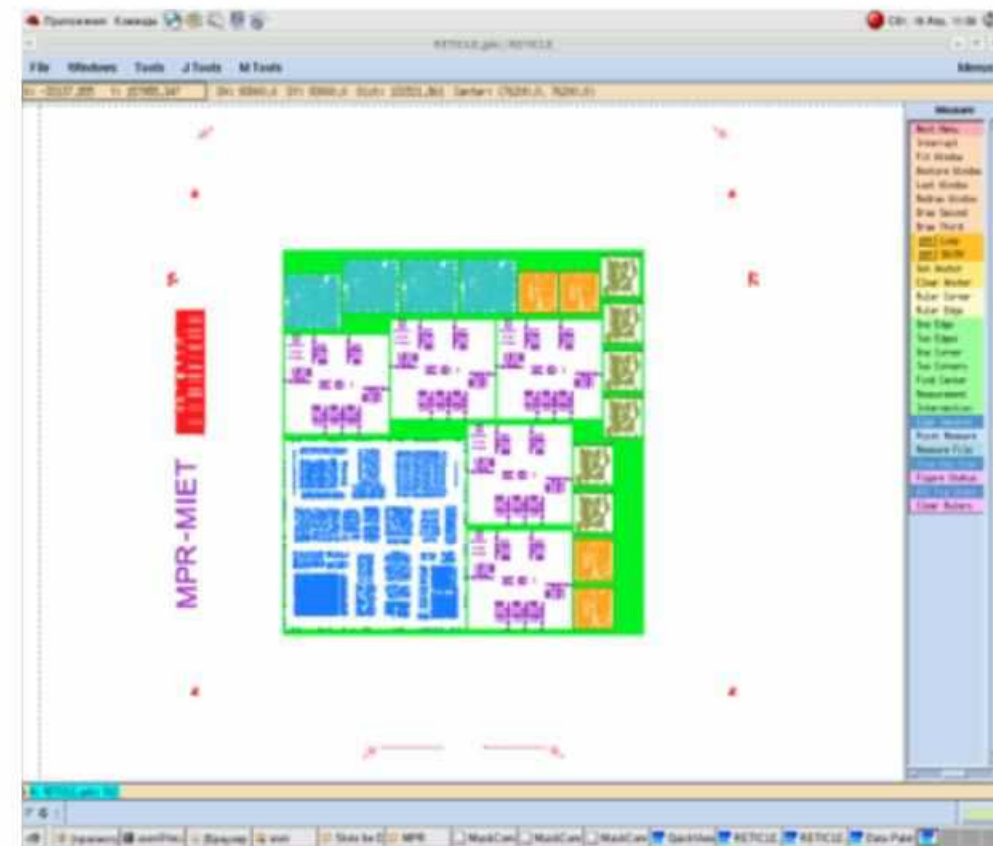


Рисунок 5.22 – Просмотр построенного фотошаблона в модуле Automated Cluster Builder

Как упоминалось ранее, одним из наиболее наукоемких и дорогостоящих этапов в полной цепочке изготовления СБИС является процесс разработки и изготовления комплекта фотошаблонов, составляющий порядка 50–70% от стоимости всего проекта изготовления прототипа (Таблица 5.1).

Решением проблемы преодоления ценового барьера при обработке проектных решений, т. е. прототипировании, является подход, основанный на разработке **мультислойных** и **мультипроектных фотошаблонов**.

Применение мультислойных и мультипроектных фотошаблонов позволяет уменьшить время проектирования полного комплекта фотошаблонов для реализации проекта путем однократного использования служебной и технологической информации для топологических слоев, а также значительно снизить стоимость проекта за счет уменьшения стоимости изготовления одного слоя.

Подчеркнем, что такой подход особенно важен при изготовлении прототипа проектируемой СБИС и при отработке проектных решений.

Таблица 5.1 – Ценовой барьер для разработчиков

Уровень, нм	180	130	90	45
Стоимость слоя, тыс. долл. США	10–15	20–25	30	40
Число слоев в комплекте	25–26	27–30	35	40
Стоимость комплекта, тыс. долл. США	250–400	550–750	900–1200	1400–1600



**Мультислойный фотошаблон (Multi-Layer Mask – MLM)** – это шаблон, в рабочем поле которого содержится несколько топологических слоев под данный проект и выбранный технологический маршрут (Рисунок 5.23-5.24).

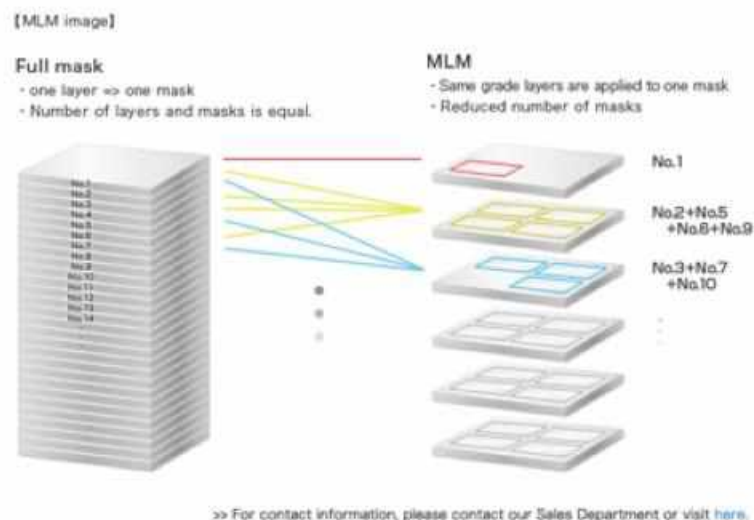


Рисунок. 5.23. Пример мультислойного фотошаблона, в котором топологии 4-х функциональных слоев размещены на одном рабочем поле

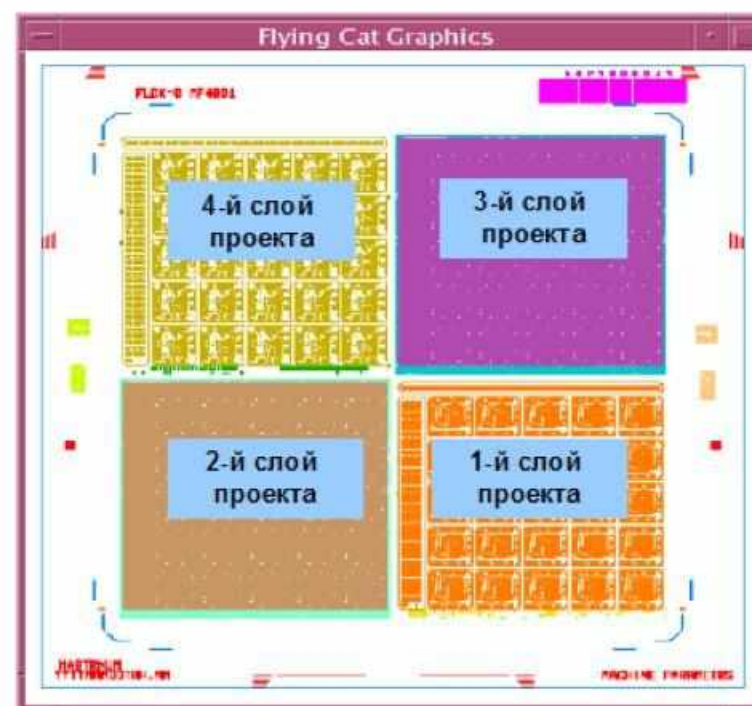


Рисунок 5.24 – Увеличенное изображение мультислойного фотошаблона



**Мультипроектный фотошаблон** (*Multi-Project Mask – MPM*) – это шаблон, в рабочем поле которого размещается несколько топологических слоев из разных проектов (часто даже от разных заказчиков), но изготавливаемых по одной технологии (Рисунок 5.25-5.26).

Это позволяет снизить конечную себестоимость проекта, т.к. за один цикл выполняется 4-16 заказов.

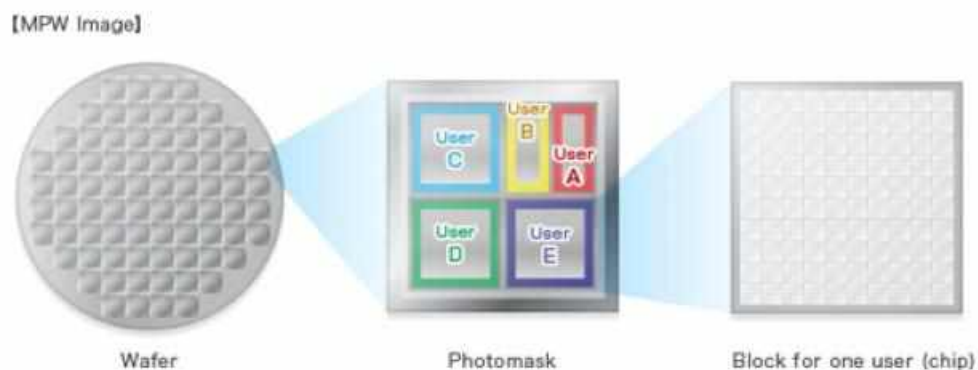


Рисунок 5.25 – На мультипроектном фотошаблоне размещены слои разных проектов одного технологического уровня и маршрута изготовления



Рисунок 5.26 – Увеличенное изображение мультипроектного фотошаблона

## 5.4. Объединение топологии кристалла и служебной информации в один файл, осуществляющий сборку фотошаблона

Следующая операция в данном маршруте – **сборка фотошаблона**, представляющая собой объединение топологии и созданной рамки.

Сборка фотошаблона может осуществляться средствами *Cadence MaskCompose* или *Synopsys CATS* (Рисунок 5.27).

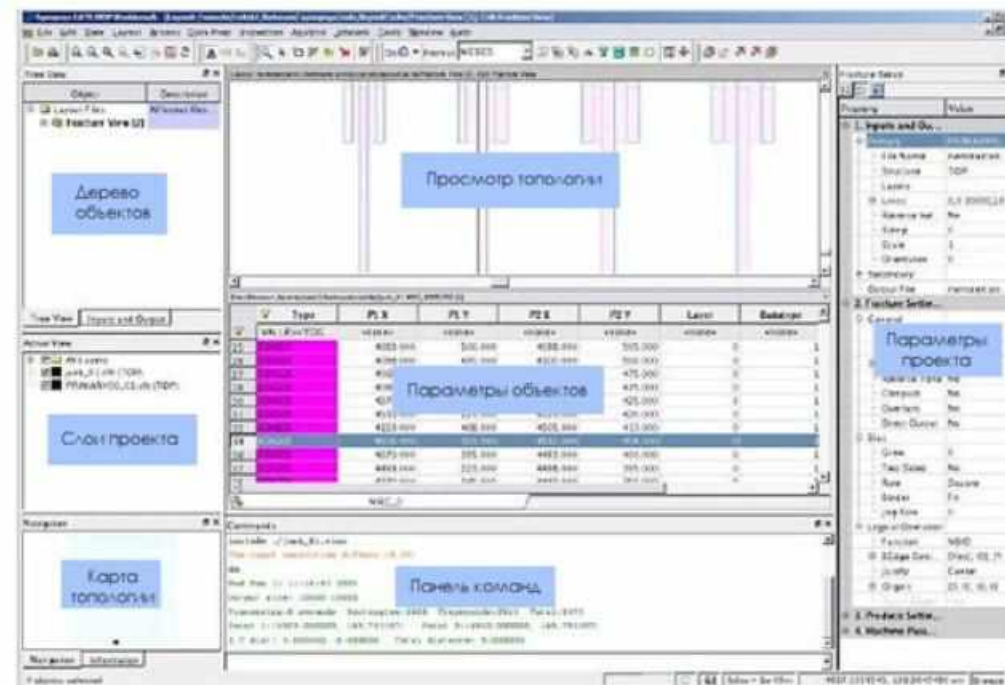


Рисунок 5.27 – Интерфейс программного пакета Synopsys CATS

При мультиплицировании чипов по площади фотошаблона и размещении технологических меток как правило, применяют *JobDeck* – формализованный файл, содержащий информацию о размещении всех элементов, ссылки на файлы с изображением, одиночные координаты или массив для каждой ссылки.

Применение *JobDeck* позволяет существенно экономить дисковое пространство при подготовке данных для изготовления фотошаблона, а также передавать эти данные между технологическими установками.

Пример генерации *JobDeck*-файла при помощи скриптового языка в *Synopsys CATS*:

```
SLICE DEM00001.JB,13
*
* SO 00001 CREATED JGH USING JBGGEN VSN 3.1.4 AT 10:27:27 ON FRI MAR 2 2007
DTITLE A,DEVICE NAME
MTITLE 1,LAYER 8 METAL
*
OPTION AA=0,5,MA
*
ORIENT A,DTITLE,TITLEROT=0,MIRROR=NO,CHARROT=0,LOC=11000,96448,JUST=L
ORIENT A,MTITLE,TITLEROT=0,MIRROR=NO,CHARROT=0,LOC=60000,96448,JUST=L
ORIENT A,NTITLE,TITLEROT=0,MIRROR=NO,CHARROT=0,LOC=25000,5408,JUST=L
ORIENT A,PTITLE,TITLEROT=0,MIRROR=NO,CHARROT=0,LOC=58040,4000,JUST=L
ORIENT A,TTITLE,TITLEROT=0,MIRROR=NO,CHARROT=0,LOC=25000,4000,JUST=L
*
CHIP <boj>KLAM,
$ (A,CGI4REF-00-0D,AD=0,5,SF=1.00)
ROWS 50800/50800
*
CHIP MAIN-1,
$ (1,OUTFILE-00-08,AD=0,125)
ROWS 50800/50800
*
end
```



## 5.5. Проверка выходных данных на соответствие техническим и производственным нормам

Так как при подготовке данных для изготовления фотошаблонов исходная топология может измениться, проводится обязательная проверка полученной геометрии. Эта проверка и называется MRC. Правила для нее сходны с правилами для DRC.

В ходе этой операции проверяется ширина полигонов, расстояние между ними, расстояние между полигонами разных слоев (Рисунок 5.28).

Но, в отличие от DRC, данные проверки могут не учитывать работоспособность схемы, а направлены лишь на то, чтобы гарантировать правильность изготовления фотошаблона (чтобы избежать смыкания полигонов и т. д.).

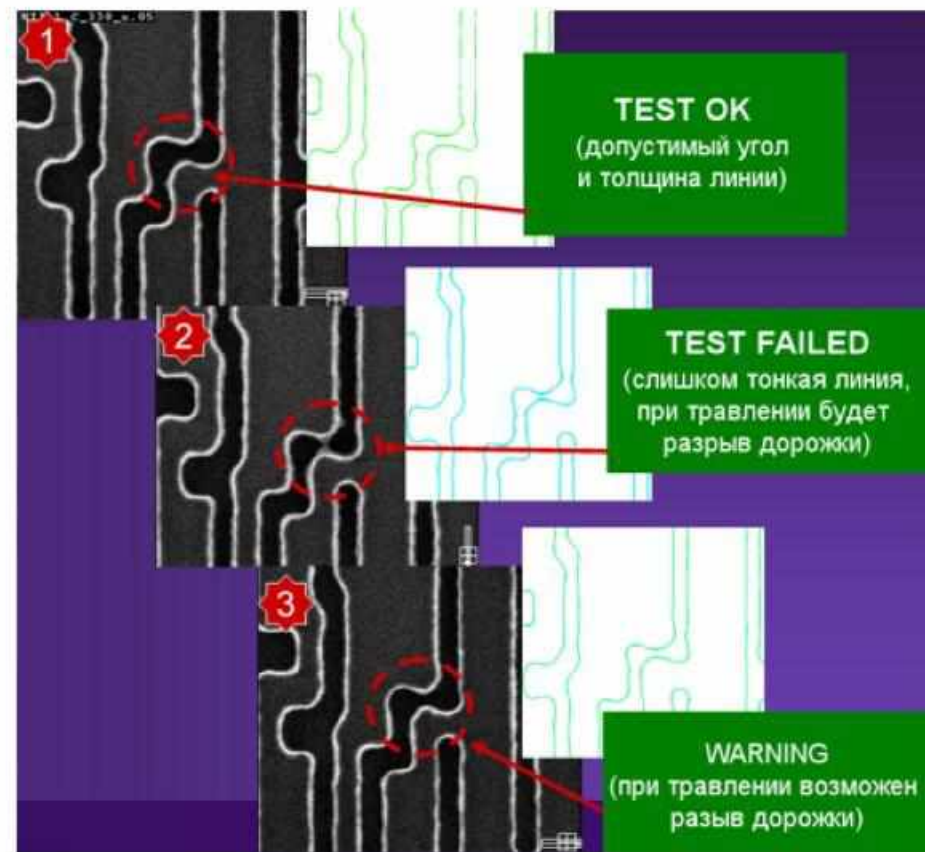


Рисунок 5.28 – Проверка соответствия размеров топологии (MRC)





---

В CATS существует несколько видов проверок *MRC*:

- *MRC Enclose* — проверка на наличие неправильных перекрытий между полигонами двух слоев/файлов.
- *MRC External1* — проверка на несоответствие расстояния между полигонами одного слоя.
- *MRC External2* — проверка на несоответствие расстояния между полигонами разных слоев.
- *MRC Inside Edge* — проверка правильности зазоров между полигонами двух слоев, в случае, когда полигон одного слоя лежит внутри полигона другого слоя.
- *MRC Internal* — проверка на наличие неправильных размеров полигонов в слое.

Также для каждой проверки существует несколько критериев:

- *SPACING* — расстояние между элементами меньше заданного;
- *MRC Layer* — задание выходного слоя, в котором будут сохраняться результаты проверок;
- *NON\_PARALLEL* — проверять расстояние между непараллельными гранями;
- *PARALLEL* — проверять расстояние между параллельными гранями;
- *LONGEDGE* — проверять полигоны с длиной стороны больше заданной;
- *HORIZONTAL\_ONLY* — проверять только в горизонтальном направлении;
- *VERTICAL\_ONLY* — проверять только в вертикальном направлении и т. д.

Команды *MRC* можно вводить в терминале *CATS* (Рисунок 5.30), в подключаемом (*.cinc*) файле или в графическом окне *MRC*.

Команды *MRC* с помощью графического интерфейса можно выполнять нажатием назначенных кнопок. Доступ к графическому меню *MRC* осуществляется из *Your menu > screens > mrc*.

Для доступа к экрану *MRC* в командной строке *CATS* необходимо набрать *screen mrc*. Окно *MRC* отображает все подкоманды *MRC*.

Для лучшей визуализации ошибок на фотошаблоне можно использовать различные цвета. Когда используется несколько цветов и флагов, команда *OVERLAP* должна быть установлена в *YES*. Для просмотра цвета устанавливается значение *Datatype* в поле *Color By* в колонке *Output*.

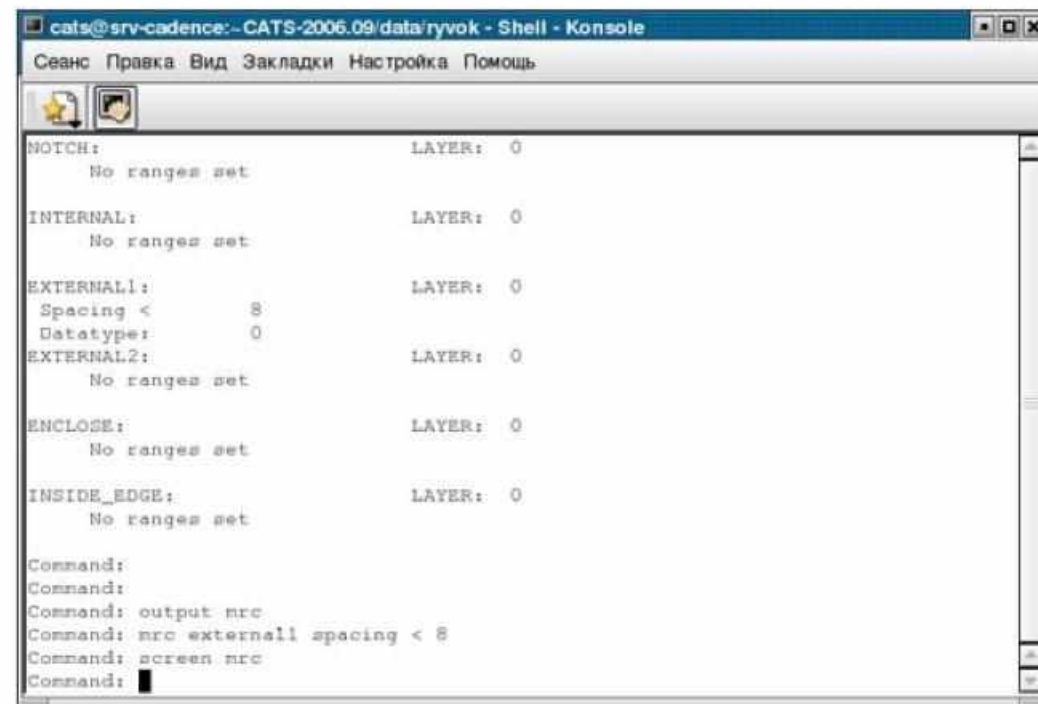


Рисунок 5.30 – Консоль, с помощью которой осуществляется ввод команд *MRC*

При включении опции (*MRC output verbose true*) генерируется специальный текстовый файл со всеми обнаруженными в топологии ошибками.

После проведения проверки система сама откроет полученный файл и выведет на экран окно *MRC Error Explorer* (Рисунок 5.31), в котором будет представлена таблица нарушений.

По нажатию на нарушение, программа покажет в графическом окне конкретное место, где обнаружена ошибка.

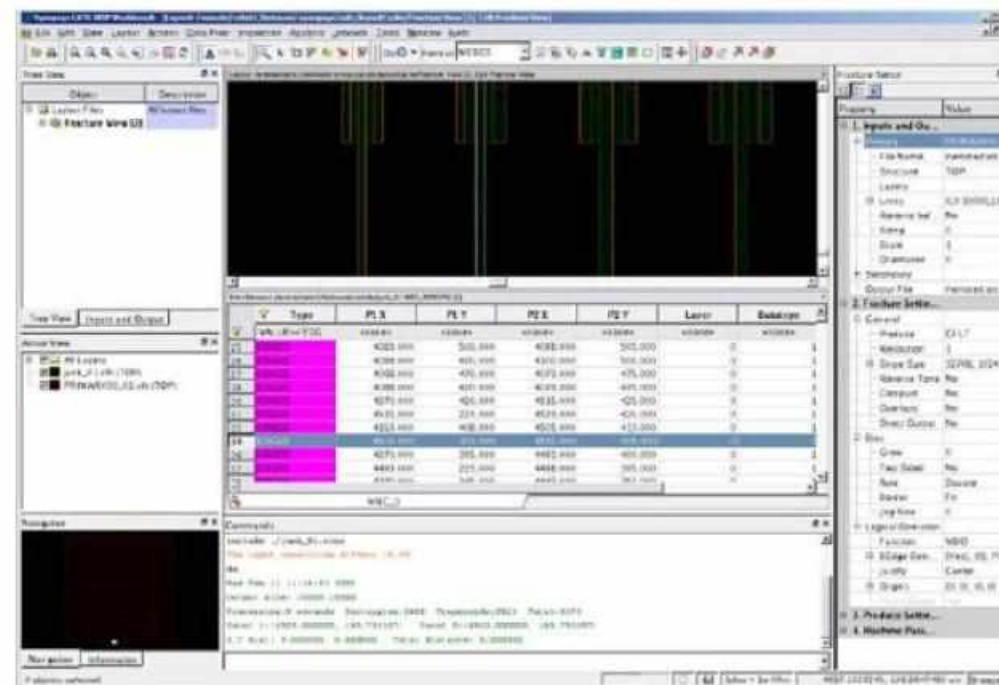


Рисунок 5.31 – Окно *MRC Error Explorer* с результатами проверки MRC



## 5.6. Перевод данных в управляющую информацию для технологического оборудования

На заключительном этапе проектирования фотошаблона осуществляется перевод данных в управляющую информацию для лазерного или электронно-лучевого генератора изображений, установок контроля критических размеров и аттестации на дефектность.

Рассмотрим пример автоматизации генерации данных в управляющую информацию для лазерного или электронно-лучевого генератора изображений при помощи САПР *Synopsys CATS*.

Использование *Synopsys CATS* возможно как в ручном режиме, так и с использованием средств автоматизации. Применение данной системы в автоматизированном режиме возможно без вывода графического интерфейса, при этом запуск осуществляется при помощи специальных управляющих файлов (скриптов).

Скрипт представляет собой текстовый файл с расширением *.cinc*, содержащий настройки и команды *CATS*, необходимые для обработки топологической информации, генерации текстовой маркировки или штрих-кода.

---

Все скрипты имеют одинаковое строение, независимо от конкретного назначения.

В структуре скрипта выделяют несколько блоков:

- *Служебные комментарии* – когда и как был создан скрипт (программа или создатель скрипта). Все строки комментариев в скриптах начинаются с символа «!».
- *Блок определения формата выходного файла и генератора изображения*, для которого будет производиться фрагментация топологии.
- *Блок задания логической функции и служебных параметров*. Задаются шаг сетки, размер страйпа MEBES-файла, включение/отключение сжатия, метод задания припусков (изменения ширины полигонов исходной топологии), включение/отключение изменения тональности исходной топологии.
- *Блок определения исходной топологии*. Указывается имя входного файла (и путь к нему, если файл находится не в директории скрипта), топологический слой для обработки, границы обработки данных, головная структура *GDSII*, коэффициент масштабирования, величина припуска, а также имя выходного файла. Этот блок может повторяться несколько раз (если обрабатываются несколько слоев одного файла или разные файлы с одинаковыми настройками). После ввода каждого файла (топологического слоя) вводится команда **DO**.
- *Команда **DO***. Выделена в отдельный блок, так как эта команда занимает особое место среди команд CATS. Она запускает процесс фрагментации топологии на примитивы в соответствии с заданными выше настройками и, по окончании этого процесса, производит запись на диск .cflt или .cref-файла.

---

При генерации баркода или текстовой маркировки в скрипт добавляются специализированные блоки, в которых задаются соответствующие настройки.

Также при генерации текста или баркода в CATS вместо файла с топологией проекта подключается заранее подготовленный пустой файл.

Пример управляющего файла для САПР Synopsys CATS:

```
!CATS C-2009.03-SP6 amd64 Linux 2.6.9-67.ELsmp
!PRODUCTION 2010/05/21 23:39:35 219715
!Wed Dec 8 02:05:17 2010
Clear
Pregrid No
Format FLAT
Function OR
Compact NO
Reverse NO PRI
Resolution 0.1
Height [327680]
Width [327680]
Input /work/_Input/***_mask.gds
Structure ***_MASK
Layers 3;0
Limits (INPUT -52000,-52000) (INPUT 52000,52000)
Switch
Input /work/_Input/***_mask.gds
Structure GSI_2010_MASK
Layers 33;-
Limits (INPUT -63500,-63500) (INPUT 63500,63500)
Switch
Output /work/_Output/***_03_new.cflt
```