

БЕЗМАСКОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ – ТРЕБОВАНИЕ СЕГОДНЯШНЕГО ДНЯ

В.Плебнович, к.т.н. Vpleba@kbtem-omo.by

Производство изделий микроэлектроники экономически целесообразно при больших объемах продукции. Современная фабрика рассчитана на ежемесячный выпуск 30 тыс. пластин диаметром 300 мм, а это сотни миллионов кристаллов. Стоимость комплекта фотошаблонов для проектных норм в 90 нм приближается к 1 млн. долл., и чтобы окупить такие расходы, нужны большие объемы выпуска ИС.

Себестоимость изготовления ИС включает затраты не только на обработку полупроводниковых пластин, но и на производство фотошаблонов. При малых объемах выпуска комплект фотошаблонов может быть в несколько раз дороже производства кристаллов. Чтобы нивелировать затраты на фотошаблоны, некоторые производители, выпускающие малые партии продукции, предлагают выполнение заказов многих клиентов на одной полупроводниковой пластине – так называемый multi-module project или multi-project. Благодаря такому подходу затраты на изготовление фотошаблонов удается распределить между всеми заказчиками. Полностью исключить процесс изготовления фотошаблонов позволяет только безмасковая литография (optical maskless lithography, или OML²).

Основу безмасковой литографии составляет генератор изображений. Раньше такие генераторы применялись только для получения рисунка топологии на фотошаблонах, сегодня компания "КБТЭМ-ОМО" (Минск, Республика Беларусь) предлагает производителям ИС генератор изображений, на котором создаются топологии как на фотошаблонах, так и на полупроводниковых пластинах. Для этого в генератор изображений для пластин встраиваются две новые системы: загрузки/выгрузки/ориентации пластин и система совмещения, обеспечивающая привязку создаваемого изображения к топологии ранее нанесенных слоев структуры ИС. Рассмотрим, как формируется изображение на полупроводниковой пластине.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА ИЗОБРАЖЕНИЙ И ОСНОВНЫЕ ЕГО БЛОКИ

Подложка с нанесенным фоторезистивным покрытием (она должна соответствовать техническим требованиям) располагается на координатном столе (рис.1).

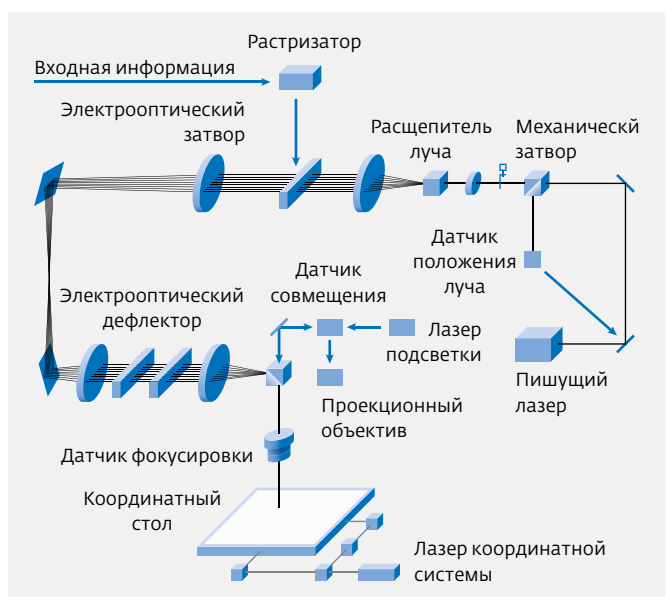


Рис.1. Структурная схема типowego генератора изображений [1]

Координатный стол – это, по сути, высокотехнологическое электро-механическое устройство, которое позволяет перемещать подложку под объективом с высокой точностью – от десятых долей до единиц нанометров (в зависимости от класса генератора изображений). Такие столы обычно укомплектованы интерференционными системами измерения положения, точность измерения которых в несколько раз выше точности перемещения. Например, точность перемещения стола для генератора ЭМ-5189-02 по осям X и Y составляет 6 нм, а точность измерения положения стола – 0,6 нм.

Имея стол с такой высокой точностью перемещения, можно создать рисунок топологии в фоторезисте, если синхронно с перемещением стола управлять интенсивностью пишущего лазера. Но производительность системы очень низкая. Для создания высокопроизводительной системы необходимо обеспечить управление не одним, а многими лучами. Генераторы изображений производства КБТЭМ-ОМО могут иметь 16- или даже 32-лучевую архитектуру, что пропорционально повышает производительность системы в 16 или 32 раза. Применение специальных электрооптических (акустооптических) дефлекторов позволяет отклонить каждый луч еще на 16 положений по одной из осей и таким образом дополнительно в 16 раз увеличить производительность, т.е. по сравнению с однолучевыми системами производительность повысится в 256 или 512 раз.

Как такой принцип реализован в генераторах изображений производства КБТЭМ-ОМО, рассмотрим на примере самого популярного генератора изображений ЭМ-5189-02 (главный конструктор Л.В.Пушкин). Основные его характеристики: размер минимального элемента – 600 нм, размер поля экспонирования – 215×215 мм, дискретность адресной сетки – 1,25 нм, 16-лучевая архитектура. Для создания минимального элемента в топологии используются два пикселя, что позволяет создавать в фоторезисте топологию с привязкой фактически к любой координатной сетке, различные стратегии создания рисунка применяются за один или два прохода.

Главный элемент любого лазерного генератора (см. рис.1*) – пишущий лазер. Данный генератор оснащен непрерывным ультрафиолетовым полупроводниковым лазером с оптической накачкой, длина волны которого

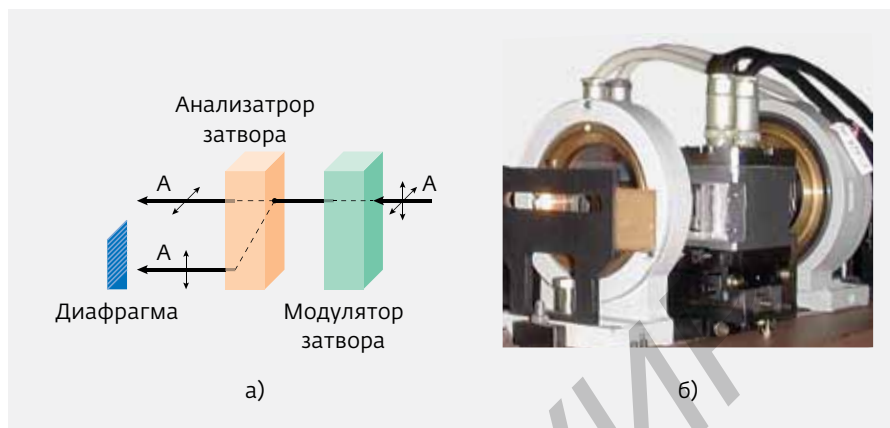


Рис.2. Электрооптический затвор: схематическое изображение (а), внешний вид (б). Стрелками указаны направления поляризации лазерного луча

составляет 355 нм. У лазера немало преимуществ: время гарантированной работы более 20 тыс. ч (примерно десять лет при односменной работе), малая потребляемая мощность 500 Вт, длина волны 355 нм и ширина спектральной линии менее 50 фм, встроенная замкнутая система охлаждения.

Но до того как луч лазера поступит в объектив, он должен пройти через многие системы. Прежде всего выходящий из лазера луч нужно стабилизировать в пространстве и по мощности. Для этого предназначен первый блок на базе датчика контроля положения луча, который приводит луч в одно и то же положение и одновременно контролирует его мощность. Следом за этим узлом находится механический затвор, который препятствует поступлению луча лазера в оптический тракт, когда не проводится экспонирование. Это позволяет исключить непреднамеренную засветку фоторезиста при проведении базирования и операции совмещения подложки, продлить время службы оптических покрытий и оптоэлектронных узлов.

Еще один важный узел – расщепитель луча, основное назначение которого – создать 16 пишущих лучей плюс один контрольный. Существует несколько конструктивных способов реализации. Сотрудники КБТЭМ-ОМО применяют специально рассчитанную дифракционную решетку-делитель на 17 порядков, которая позволяет расщепить луч лазера на нужное количество равнозначных по интенсивности лучей, не требующих подстройки в процессе эксплуатации.

Сформированные таким образом лазерные лучи поступают на электрооптический затвор (рис.2), который с высокой скоростью (оперативно) управляет интенсивностью каждого луча. Для этих целей могут использоваться и акустооптические затворы. Основной элемент электрооптического затвора – анализатор из исландского шпата. Благодаря высокому двойному лучепреломлению света

* Иллюстрации 1, 2, 3 и 8 взяты из презентации Л.В.Пушкина "Генератор изображений ЭМ-5189".

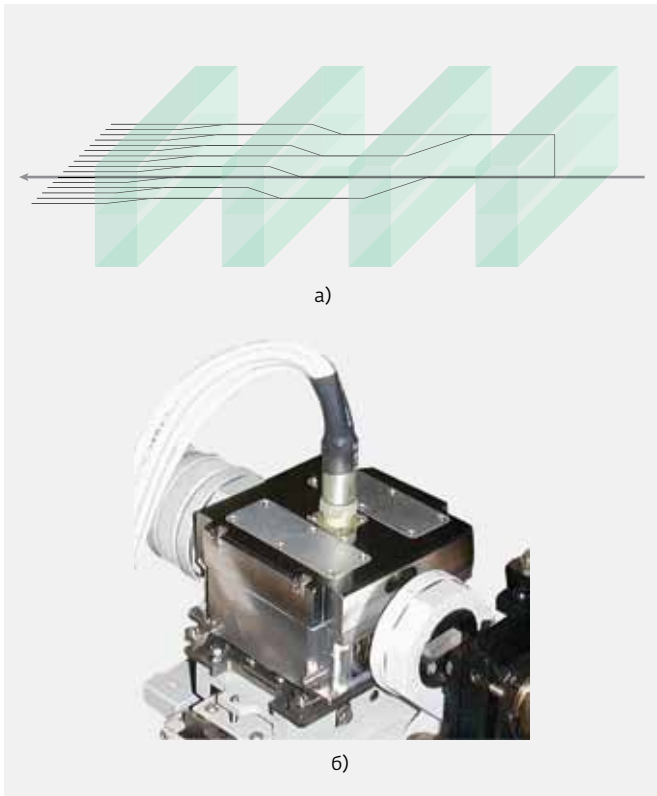


Рис.3. Электрооптический дефлектор: схематическое изображение (а), внешний вид (б)

(0,172) и хорошей прозрачности в видимой и ультрафиолетовой областях спектра исландский шпат используется в оптических и оптоэлектронных системах для поляризации света и управления световыми потоками. Под воздействием внешнего постоянного или переменного электрического поля в среде наблюдается двойное лучепреломление вследствие изменения поляризации вещества. (Электрооптический эффект был открыт в 1875 году шотландским физиком Джоном Керром. Оптический эффект Керра оказался очень быстрым – от сотен фемтосекунд до нескольких наносекунд.)

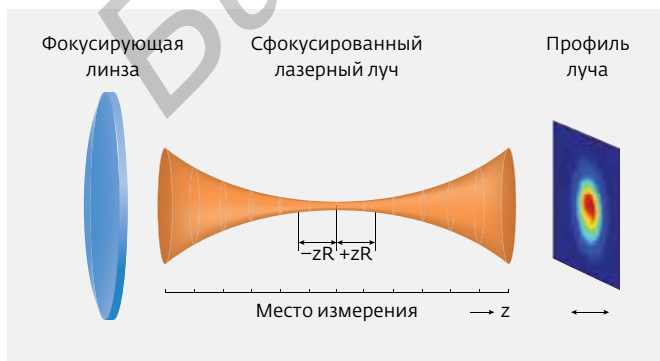


Рис.4. Форма лазерного луча, выходящего из объектива

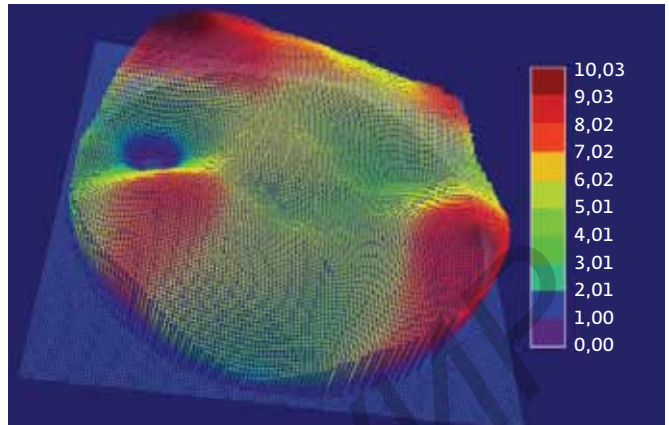


Рис.5. Реальный профиль кремниевой пластины

Перед анализатором затвора размещен модулятор затвора, представляющий собой линейный поляризатор света (см. рис.2).

При подаче управляющего напряжения на затвор формируется луч А с вертикальной поляризацией. Интенсивность луча прямо пропорциональна квадрату напряжения, подаваемого на затвор. По мере увеличения интенсивности луча с вертикальной поляризацией уменьшается интенсивность основного луча. Луч с вертикальной поляризацией не используется при работе установки и направляется на глухую диафрагму, а основной луч – далее по оптической схеме генератора изображений. Так распространяются все пишущие лучи. Контрольный луч обеспечивает контроль работы лазера. Такую оптическую схему можно применять для создания изображений в фоторезисте, но производительность ее будет недостаточной.

Чтобы повысить производительность, в оптическую схему установки встроен электрооптический дефлектор [2], который позволяет отклонить каждый луч на 16 фиксированных положений (рис.3).

В основе работы электрооптического дефлектора лежит тот же электрооптический эффект Керра, только реализация другая. Отклонение вторичного луча зависит от толщины пластины и, изменяя толщину пластины

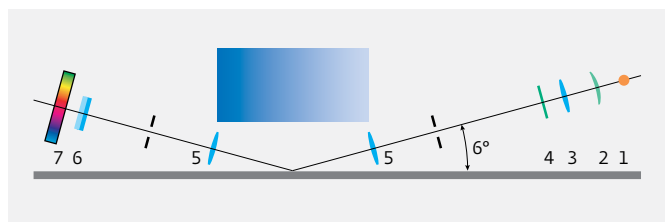


Рис.6. Схематическое изображение датчика фокусировки: 1 – светодиод; 2, 3, 5, 6 – линзы, 4 – маска, 7 – ПЗС-приемник

в процессе производства, можно регулировать величину отклонения лазерного луча. Каждая из четырех пластин отличается по величине от самой толстой пластины на 1/4, что позволяет, подавая соответствующие напряжения на каждую из пластин, направлять луч лазера в одно из 16 фиксированных положений. Фактически дефлектор используется как логический дешифратор, результат его работы – выбор одного из 16 положений лазерного луча. Дефлектор одновременно управляет всеми лазерными лучами, что позволяет дополнительно увеличить производительность генератора изображений в 16 раз.

Сформированные лазерные лучи через проекционный объектив направляются на поверхность обрабатываемой подложки с нанесенным фоторезистом. Проекционный объектив предназначен для фокусировки лазерных лучей в минимально возможную точку на поверхности фоторезиста. Для генератора ЭМ-5189–02 объектив имеет апертуру 0,6, увеличение 133х, что обеспечивает рабочий пиксель менее 350 нм. Лазерные лучи, выходящие из объектива, имеют форму, представленную на рис.4.

Наименьшее сечение луча будет находиться точно в фокусе и поддерживаться с отклонением не более 10% в диапазоне глубины фокуса. Для рассматриваемого генератора глубина фокуса составляет примерно 1 мкм.

Подложки, на которых создается рисунок топологии, не идеальны (рис.5). По ТУ ВУ 100386629.151–2010 для пластин диаметром 150 мм установлены следующие нормы. Предельное отклонение по толщине в одной партии пластин ±20 мкм. Общее отклонение по толщине по пластине, клин (TTV) не более 6 мкм на длине 16 мм. Коробление (warp), прогиб (bow) не более 40 мкм. Коробление (или прогиб) после термоиспытаний 60 мкм.

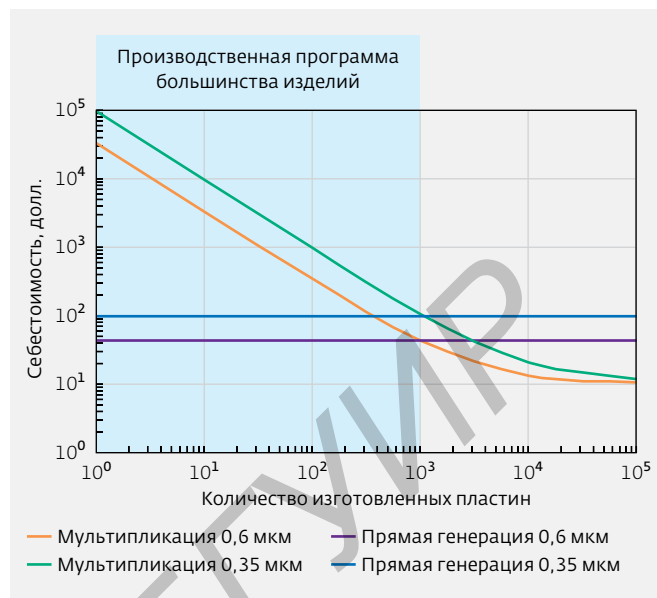


Рис.7. Себестоимость фотолитографии в зависимости от объема выпуска изделий для генератора изображений (прямая генерация) и степпера (мультипликация)

Непланарность – расстояние между нижней и верхней точкой топологии – составляет около 1 мкм для технологии 0,8 мкм и 0,25 мкм для технологии 0,35 мкм. Толщина фоторезиста, в котором формируют изображение, как правило, около 1 мкм. Все это показывает, насколько важно поддерживать точное расположение подложки в фокусе объектива.

Для сохранения стабильного положения поверхности подложки относительно проекционного объектива (в лучшем фокусе) предназначена система автоматической фокусировки, построенная на датчике

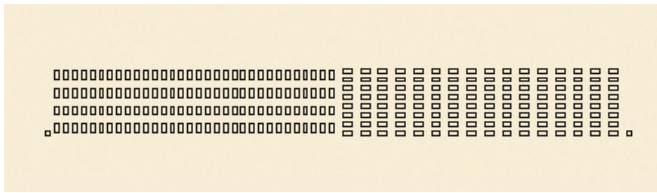


Рис.8. Метка совмещения

фокусировки. Принцип работы этого датчика представлен на рис.6 [3].

Луч света, проходя через маску, создает изображение маски в плоскости подложки. Отраженное от подложки изображение проходит через оптическую систему, состоящую из линз (3, 4), и проецируется на ПЗС-приемник. Оптическая ось датчика фокусировки расположена под углом в 6° к плоскости подложки, что позволяет точно идентифицировать верхнюю поверхность фоторезиста на подложке и исключить оптические эффекты. После специальной математической обработки сигнала с ПЗС-приемника компьютер, управляющий автоматической фокусировкой, точно определяет место нахождения плоскости подложки. Система автоматически вырабатывает сигнал коррекции для перемещения подложки в точку лучшего фокуса. Так как плоскость подложки в процессе создания топологии динамически изменяется, система автоматической фокусировки работает в режиме непрерывного отслеживания поверхности подложки.

Описанная структурная схема генератора изображений может обеспечить создание топологии на подложке, но не воспроизводимость топологических элементов, стабильность во времени и температурную независимость. Для поддержания оптимальных параметров генератора изображений необходимо регулярно проводить автоматическую аттестацию всех основных узлов и их автоматическую подстройку. Для этого установка

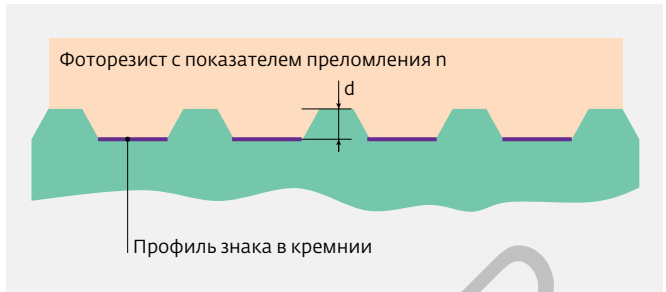


Рис.9. Метка совмещения в поперечном разрезе

оснащена набором датчиков и систем автоматической регулировки. Каждый луч генератора изображений периодически автоматически юстируется, аттестовывается по размеру, калибруется по интенсивности.

Для поддержания стабильности метрологической системы в систему аттестации встроена термостабильная мера длины, что позволяет изготавливать метрологически достоверные топологии в требуемом диапазоне температур (от $19,5$ до $20,5^\circ\text{C}$) и через большие промежутки времени (более десяти лет). На практике это означает, что если через десять лет понадобится заменить один фотошаблон в комплекте, то достаточно будет изготовить только шаблон, а не полный комплект.

Генератор изображений предусматривает калибровку координатной системы стола, что позволяет при необходимости использовать генератор изображений вместе с установкой проекционной печати других производителей (с отличной системой координат) или подстроить координатную систему генератора под ранее применявшийся генератор. Таким образом уменьшаются расходы на поддержание архива фотошаблонов.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ГЕНЕРАТОРА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Приобретая генератор изображений, нужно оценить получаемые дополнительные возможности. Как следует из названия этой статьи, исключение из технологического процесса шаблонного хозяйства дает возможность сэкономить две-три недели на изготовлении каждого комплекта фотошаблонов и, соответственно, ускорить выпуск опытных образцов, дополнительно к этому обеспечивается экономия значительных денежных средств (по некоторым оценкам, примерно 100 тыс. долл.) на освоение каждого нового изделия. Если этого недостаточно, можно рассмотреть такую

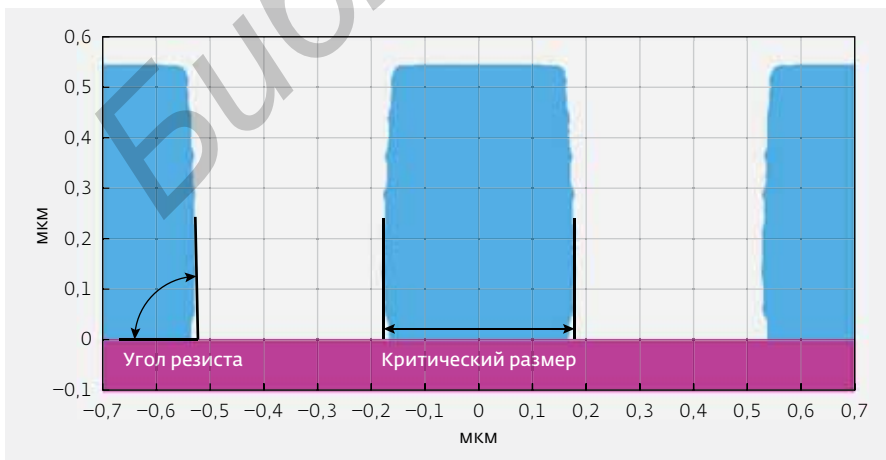


Рис.10. Критерии определения "окна процесса"

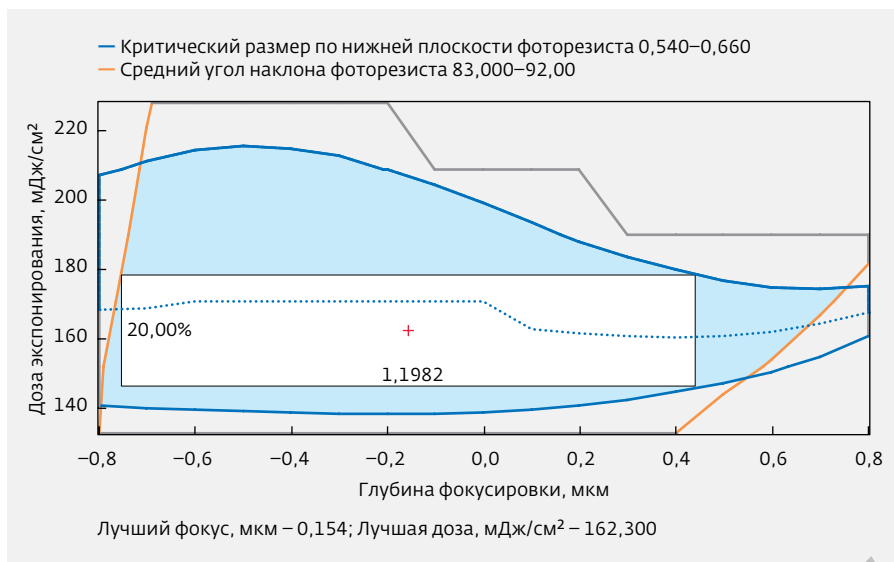


Рис.11. "Окно процесса" генератора изображений ЭМ-5189-02 при получении критических размеров 0,6 мкм в фоторезисте SPR955CM толщиной 0,97 мкм

возможность, как создание multi-project в рамках собственного проекта. Это целесообразно, если некоторые узлы проекта не подлежат точному моделированию и расчету или есть сомнение в правильном выборе схмотехнического решения. В результате на одной пластине, изготовленной в одних технологических режимах, можно получить все конструктивные варианты и выбрать действительно оптимальное конструкторское решение.

В мелкосерийном производстве multi-project позволит на одной пластине создавать различные зашивки

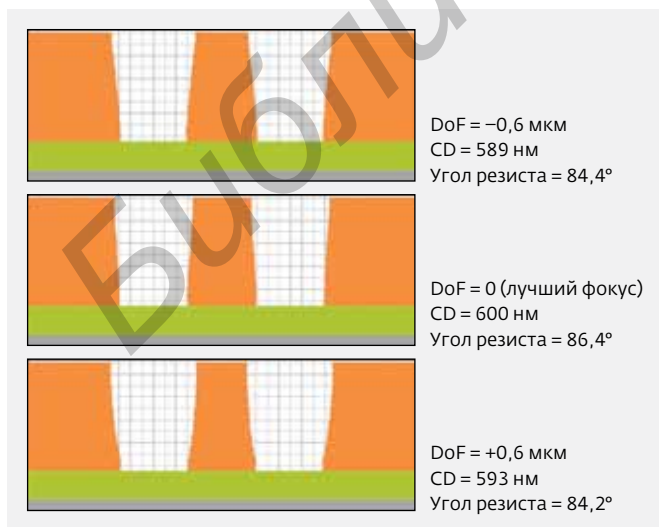


Рис.12. Результаты моделирования профиля фоторезиста. DoF – глубина фокусировки и CD – критический размер

топологии БМК, ПЛИС, ПЗУ и экономить ресурсы. В то же время большое поле экспонирования (215×215 мм) расширяет возможности и позволяет создавать изделия размером с подложку, что перспективно при производстве распределенных сенсоров, ПЗС-матриц, мультиплексоров, СВЧ печатных плат и переходных плат для 3D-систем в корпусе.

Экономическая целесообразность применения генератора изображений зависит от объема производства изделия (рис.7). Для большинства изделий специального назначения программа выпуска составляет менее 1000 пластин, что соответствует экономической целесообразности использования генератора изображений.

МЕТКИ СОВМЕЩЕНИЯ

Для точного совмещения создаваемой топологии с предыдущими слоями используются метки совмещения (рис.8), которые формируются на подложке при первой фотолитографии. В дальнейшем технологическая служба принимает все меры, чтобы их сохранить. Генератор изображений укомплектован прецизионной видеокамерой (см. рис.1), которая выделяет знак совмещения и точно определяет его координаты. Для лучшей защищенности метки от влияния технологического

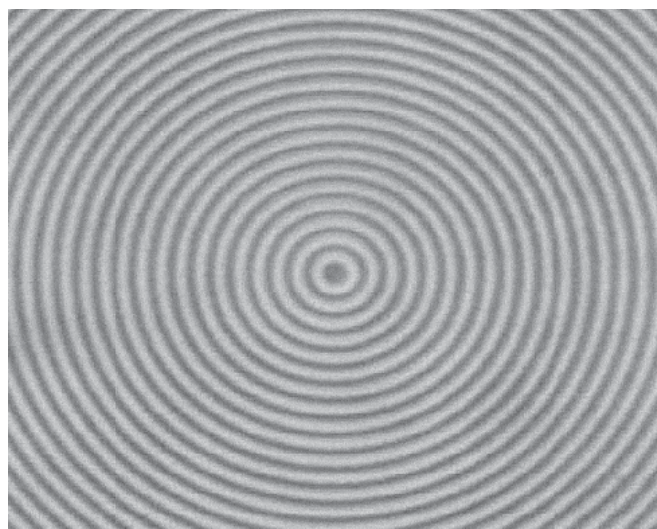


Рис.13. Фотография топологии концентрированных кругов с шагом 0,6+0,6 мкм, выполненной на генераторе изображений ЭМ-5189

Основные параметры генераторов изображений

Параметры	ЭМ-5189-02	ЭМ-5289Б
Число проходов	2	2
Размер минимального элемента, нм	600	350
Погрешность совмещения, нм	70	50
Точность расположения элемента, нм	60	40
Среднее отклонение от номинала, нм	40	25
Равномерность критического размера, нм	40	25
Неровность края, нм	40	30

процесса используются дифракционные метки (применяются на всех современных установках компании "КБТЭМ-ОМО" и мировых производителей степперов Nikon, Canon, ASML).

Метка в поперечном разрезе представлена на рис.9. Основное требование при формировании метки – глубина травления d. Согласно требованиям документации глубина травления должна быть равна 0,11 мкм, 0,33 мкм, 0,55 мкм... и иметь разброс по подложке не более 20% от номинального значения. Соблюдение параметров метки позволяет обеспечить точность совмещения не ниже 70 нм для ЭМ-5189-02 (50 нм – ЭМ-5289Б).

Управляющая программа генератора изображений имеет внутренний формат МК1 и создается автоматически с традиционных форматов проектирования топологии GDSII или DXF программным обеспечением, которое поставляется вместе с установкой.

Перед началом процесса экспонирования подложек технологический процесс моделируется при помощи

специального программного комплекса SILID-C. Цель моделирования – определение "окна процесса" по двум критериям: минимальный размер элемента и угол наклона фоторезиста (рис.10). Моделирование проводил начальник лаборатории разработки и исследования оптических систем оптико-механического оборудования Г.И.Тихончук.

Исходные данные для моделирования процесса фотолитографии на генераторе изображений ЭМ-5189-02: фоторезист – SPR955CM; толщина фоторезиста – 0,96 мкм; подложка – кремний со слоем поликремния толщиной 0,25 мкм; длина волны 365 нм; числовая апертура 0,6. Критерии определения "окна процесса": критический размер в фоторезисте – 0,6 мкм; угол наклона фоторезиста >0,83°. В результате моделирования (рис.11) получаем "окно процесса" со следующими параметрами: при изменении экспозиции на 20% глубина фокусировки будет составлять 1,2 мкм, что соответствует "окну процесса" хорошего степпера. На рис.12 представлены результаты моделирования профиля фоторезиста для трех точек "окна процесса": крайние точки фокуса и лучший фокус.

Результаты моделирования свидетельствуют о широких возможностях генератора изображений при формировании рисунка топологии в производстве изделий микроэлектроники.

Фотография топологии, выполненной на генераторе изображений ЭМ-5189-02, представлена на рис.13. Основные параметры генераторов изображений сведены в таблицу.

Необходимо подчеркнуть, что параметры генератора изображений компании "КБТЭМ-ОМО" соответствуют дорожной карте развития микроэлектроники и подтверждают в процессе сдачи оборудования заказчику.

Более полная информация о разработках компании доступна на сайте <http://kb-omo.by> или по телефону: +375173922406.

В заключение призываю специалистов, работающих на предприятиях радиоэлектронной промышленности, больше доверять отечественным разработчикам оборудования и тем самым стимулировать их к новым более сложным проектам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент Республики Беларусь №14775. Опубликовано 30.08.2011. Многоканальный генератор изображений // Пушкин Л.В., Аваков С.М., Колупаев В.Д., Есьман В.М.
2. Патент Республики Беларусь U 6587. Опубликовано 30.10.2010. Устройство управления многокаскадным электрооптическим дефлектором // Адзериho Б.Г., Колупаев В.Д., Шүлейко И. Б.
3. Патент Республики Беларусь U 6302. Опубликовано 30.06.2010. Устройство автоматической фокусировки // Окорок А.Г., Стасевич М.Н., Есьман В.М.

Библиотека БГУИР