

СОЗДАНИЕ ЭКБ. ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ИЛИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ?

В.Плебанович, к.т.н. vpleba@kbtem-omo.by

В начале октября 2014 года в Ялте состоялась XIII отраслевая научно-техническая конференция "Инновационные технологии радиоэлектроники регионам России", на которой обсуждались вопросы развития современных технологий, технического перевооружения отрасли, проблемы импортозамещения в радиоэлектронной промышленности. Решение задачи импортозамещения – один из ключевых элементов реализации Государственной программы "Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 годы". В соответствии с поручением Правительства Российской Федерации Минпромторгом России подготовлен план мероприятий "Содействие импортозамещению в промышленности", направленных на создание благоприятных условий, механизмов государственной поддержки, включая разработку целевых ориентиров импортозамещения в промышленности и эффективных мер государственной поддержки и стимулирования этого направления. Один из способов решения проблемы импортозамещения представлен в статье заместителя директора ОАО "КБТЭМ-ОМО" Владимира Ивановича Плебановича.

В докладе директора Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга Российской Федерации Сергея Владимировича Хохлова на отраслевой научно-технической конференции были приведены следующие результаты выполнения ФЦП "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008–2015 годы:

- достигнут технологический уровень 90 нм;
- постоянно увеличивается количество объектов, которые прошли техническое перевооружение (в 2011 году – 18 предприятий, в 2014-м – 39, в 2015-м планируется модернизировать 112 предприятий);
- создаются новые рабочие места (в 2011 году дополнительно появилось 3,8 тыс. рабочих мест, в 2014-м – 4,4 тыс.);
- растут объемы продаж.

Техническое перевооружение предприятий радиоэлектронного комплекса требует поставок

большого количества современного оборудования, которое не только позволит обновить производственные мощности, но и станет основой внедрения инновационных технологий.

В силу стереотипов мы чаще всего ищем инновационные технологии за рубежом своей страны и верим, что только иностранные специалисты могут создавать новое и прогрессивное. Отчасти так и есть: компьютеры, планшеты, смартфоны – все это преимущественно зарубежного производства. Но разрабатывают и выпускают их не только самые передовые государства, среди поставщиков много стран, которые еще недавно были аутсайдерами. Периодически на этом рынке появляются новые производители с инновационными идеями.

Но одно дело проиграть рынок ширпотреба и совсем иное – упустить стратегический рынок средств производства. К примеру, недавно на рынке мобильных телефонов произошла революция,

не только обновился функционал моделей аппаратов, но и сменился лидер. Все это произошло довольно быстро. В основе революции всего три идеи: предложить расширенный функционал в красивой упаковке по цене ниже рыночной.

Реализации этих идей способствовали гений человеческой мысли, потребность рынка и средства производства. Не было бы средств производства – ключевого звена всей цепочки – идея осталась бы нереализованной. В случае обострения политической борьбы соперник всегда старается взять под контроль и ограничить передачу технологий и средств производства. Это же происходит с поставками оборудования в условиях санкций против России. А торговлю ширпотребом, даже самым современным, никто не ограничивает. Напротив, покупай, сколько хочешь.

В период действия санкций принято вспоминать об импортозамещении и строить соответствующие планы. Однако мы давно разрабатываем и производим аналогичное или даже более перспективное оборудование, поэтому сегодня лучше говорить *не об импортозамещении, а о внедрении собственных инновационных разработок.*

Перечислим лишь некоторые отечественные инновационные разработки, которые успешно используются на предприятиях микроэлектроники РФ и могут быть рекомендованы для широкого применения:

- безмасочная литография;
- автоматический контроль микродефектов на пластинах с топологией;
- прецизионная двусторонняя литография;
- автоматический контроль и устранение дефектов на фотошаблоне ("0" дефектов).

Многоэтапный и продолжительный процесс разработки и изготовления интегральной микросхемы (ИМС) занимает около 100 недель. Конструктор начинает разработку с создания поведенческой модели, описывает функционал микросхемы на языках высокого уровня, затем проводит синтез, оптимизацию логического описания микросхемы, моделирование функций и топологическое проектирование. В результате получается ИМС, которая и должна быть реализована в кремнии или другом полупроводнике. Стоит отметить, что полный цикл разработки топологии выполняется на основе физических моделей, точных математических расчетов и, как правило, при четкой организации процесса обеспечивает соответствие заявленным параметрам и высокий процент выхода.

Следующий этап реализации разработанной ИМС – изготовление фотошаблонов, основное

требование к которым – отсутствие дефектов. К ним (к дефектам) относится наличие или отсутствие дополнительных частей элементов; расположение элементов в узлах координатной сетки в соответствии с разработанной топологией. Стандарт SEMI предусматривает 43 типа дефектов (рис.1), при этом только первые 24 типа оператор может выявить при контроле под микроскопом, все остальные можно обнаружить с помощью установки автоматического контроля дефектности. Недавно сотрудники КБТЭМ-ОМО совместно с одной из российских фирм провели анализ фотошаблона, изготовленного на отечественной фабрике, которая не оснащена автоматическими установками контроля топологии. Выяснилось, что ширина токозадающего резистора превышена на 63%, два рядом расположенных резистора – несимметричны и т.д. (рис.2). Самое главное (и самое неприятное при этом) – дефекты выявлены на фотошаблоне, который должен полностью соответствовать конструкторскому проекту.

Другой пример: один из миллиона затворов на шаблоне, изготовленном на зарубежной фабрике, имеет значительно заниженный размер (рис.3). И это при наличии на предприятии КИО (контрольно-измерительного оборудования) и автоматических систем контроля топологии (трудно представить, что их нет).

Не менее важными аспектами создания фотошаблонов являются время и стоимость их изготовления. Стоимость фотошаблона зависит от сложности и требований, предъявляемых к качеству работ. По некоторым оценкам, изготовление комплекта фотошаблонов для технологии 0,35 мкм займет как минимум две недели и обойдется в 35 тыс. долл.

Таким образом, на этапе освоения субмикронных технологий необходимо решить следующие проблемы:

- обеспечить полное соответствие фотошаблона конструкторскому проекту ("0" дефектов);
- сохранить все ноу-хау;
- сократить стоимость комплекта фотошаблонов и время, необходимое для его изготовления.

Наиболее полным решением перечисленных проблем, на наш взгляд, является освоение безмасочной литографии.

БЕЗМАСОЧНАЯ ЛИТОГРАФИЯ (OPTICAL MASKLESS LITHOGRAPHY, OML2)

В процессе безмасочной фотолитографии для реализации топологии не требуется изготавливать фотошаблоны, а рисунок топологии создается путем засветки нужных областей фоторезиста

1. Прокол	2. Островок	3. Выступ 1	4. Выступ 2	5. Выступ 3
6. Выступ 4	7. Вырыв 1	8. Вырыв 2	9. Вырыв 3	10. Вырыв 4
11. Выступ уг. 1	12. Выступ уг. 2	13. Выступ уг. 3	14. Выступ уг. 4	15. Выступ уг. 5
16. Выступ уг. 6	17. Выступ уг. 7	18. Выступ уг. 8	19. Вырыв уг. 1	20. Вырыв уг. 2
21. Вырыв уг. 3	22. Вырыв уг. 4	23. Мостик 1	24. Мостик 2	25. Ув. размер
26. Ум. размер	27. Нет эл-та	28. Избыток 1	29. Избыток 2	30. Избыток 3
31. Избыток 4	32. Усечение 1	33. Усечение 2	34. Усечение 3	35. Усечение 4
36. Смещение 1	37. Смещение 2	38. Смещение 3	39. Смещение 4	40. Смещение 5
41. Смещение 6	42. Смещение 7	43. Смещение 8	Стандарт SEMI	

Рис.1. Типы выявляемых дефектов топологии по стандарту SEMI

в соответствии с проектом топологии. Для формирования топологии на подложке используются лазерные сканирующие генераторы изображений наподобие тех, которые применяются для изготовления фотошаблонов, но только модернизированные для работы с полупроводниковыми

пластинами и дополненные системами автоматического совмещения по меткам.

Для генераторов изображений, работающих с одним лучом, не характерна большая производительность, поэтому современные установки делают с 16 или 32 лучами, что способствует значительному повышению производительности.

Вторая особенность современного генератора – способ формирования элемента минимального размера. Для получения качественного минимального



Рис.2. Результаты тестирования фотошаблона на соответствие топологии

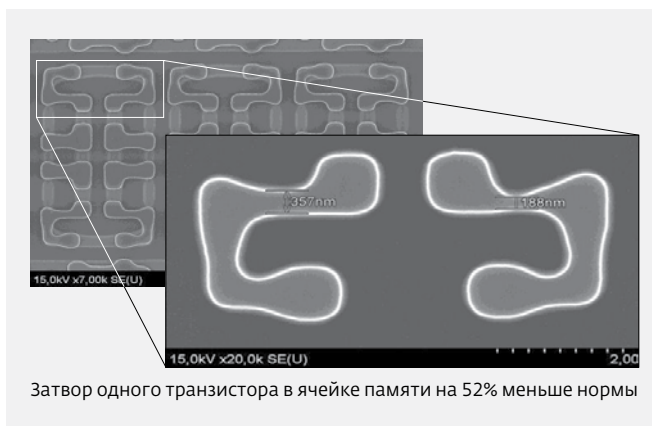


Рис.3. Несоответствие критических размеров на фотошаблоне

(0,6 мкм; 0,35 мкм) элемента требуются, по крайней мере, два пикселя, в противном случае элемент не будет находиться в нужном месте топологии либо будут введены ограничения в правилах проектирования (координатная сетка будет очень грубой).

Генераторы изображений с большим ходом рабочего стола позволяют создавать топологию размером с полупроводниковую пластину без сшивки изображений, что значительно повышает качество топологии. При работе с большими полями (подложками) важно, какой тип автофокусировки применяется. В дешевых генераторах изображений автофокусировка построена на датчиках давления, которые более или менее качественно поддерживают фокусировку только в центральной части подложки. При переходе к ее краю проявляются эффекты, связанные с конечными размерами подложки, что снижает точность фокусировки. Наиболее перспективные системы фокусировки строятся на ПЗС-линейках, благодаря чему требуемое качество обеспечивается по всей поверхности подложки. Такая фокусировка позволяет перемещать фокус по глубине фоторезиста и создавать 3D-изображение. ПЗС-фокусировка применима не только к непрозрачным подложкам (кремнию, арсениду галлия, карбиду кремния и др.), но и к прозрачным (кварцу, ниобату лития, танталату лития и др.).

КБТЭМ-ОМО поставяет две модели генераторов (рис.4), оптимизированные под проектные нормы 350 нм и 600 нм, оба генератора работают как с подложками, так и с фотошаблонными заготовками. Генератор ЭМ-5189-02 укомплектован



Рис.4. Генераторы изображений – ЭМ-5189-02 и ЭМ-5289Б

твердотельным лазером с гарантированным временем эксплуатации 22,5 тыс. часов, что при односменной работе обеспечит бесперебойную работу на протяжении более 11 лет.

Чтобы понять, при каких объемах выпуска применение генераторов изображений экономически обосновано, можно обратиться к графику (рис.5). При использовании генераторов себестоимость обработки пластины не зависит от объема выпуска продукции и составляет в среднем 50 долл./пл. для проектной нормы 0,6 мкм. Другое дело – степпер. Для работы на нем нужно изготовить и проверить комплект фотошаблонов, выпустив экспериментальную и опытную партии изделия. Стоимость комплекта шаблонов включается в стоимость всех изготавливаемых пластин, поэтому себестоимость фотолитографии при работе на степпере при плане выпуска менее 1 тыс. пластин будет значительно выше, чем при работе на генераторе изображений. Если планируется серийный выпуск изделия в больших объемах, то его выгодно производить на степперах.

Таким образом, применение генераторов изображений экономически выгодно при выпуске продукции объемом до 1 тыс. пластин. Генератор изображений позволяет отказаться от изготовления фотошаблонов и тем самым избежать проблем, связанных с точностью изготовления шаблонов, сэкономить значительные средства на покупку комплекта фотошаблонов и главное – сократить за счет этого общий цикл разработки ИМС.

Применение генераторов изображений позволит сохранить ноу-хау, обезопасить себя от "закладок",

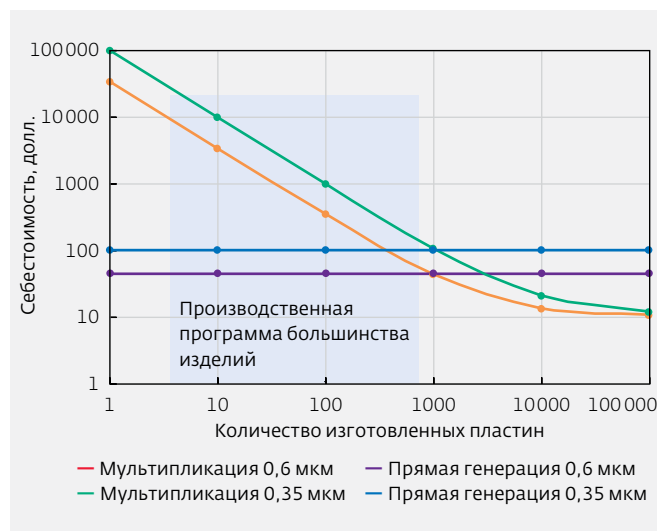


Рис.5. Себестоимость процесса фотолитографии в пересчете на пластину

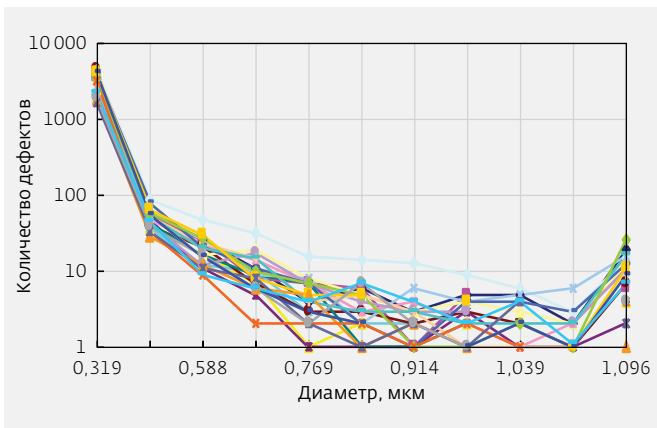


Рис.6. Гистограмма распределения дефектов от их диаметра

изготовить систему на кристалле, МАКРОсхему, ПЗС-матрицу, мультиплексор размерами с пластину, в каждый кристалл на пластине впечатать свою оригинальную топологию.

Автоматический контроль микродефектов на пластинах с топологией

Производство микросхем – сложный технологический процесс. Для получения предельных характеристик необходимо освоить субмикронные нормы. Большинство предприятий активно внедряет новые технологии, не в полной мере отдавая себе отчет в том, с какими проблемами придется столкнуться.

Одна из них – **дефектность**. Если взять коробку абсолютно чистых пластин (проверенного производителя) для анализа на установке автоматического контроля ЭМ-6479 (или аналогичной) на привносимые дефекты и отразить на графике зависимость количества дефектов от их площади, результат будет подобен представленному на рис.6. Когда ИМС производились на основе микронной технологии (и даже 0,8 мкм), общее количество дефектов, которые могли повлиять на качество продукции, исчислялось единицами. С переходом на субмикронные технологии количество дефектов увеличивается экспоненциально и для проектной нормы 0,35 мкм исчисляется уже тысячами на чистой подложке.

Рассмотреть дефекты размером 0,35 мкм под микроскопом в видимом свете нельзя. Не вдаваясь в теоретические аспекты, отметим, что выявить дефекты таких размеров можно либо в жестком ультрафиолете (UV, DUV), либо на растровом электронном микроскопе (РЭМ), что в большинстве случаев

неприемлемо при контроле дефектов в рабочем цикле.

Дефекты в технологическом процессе возникают при выполнении таких операций, как фотолитография, плазмохимическое травление, нанесение слоев, химико-механическая полировка и др. По внешнему виду дефекты сильно различаются, поэтому желательно иметь универсальное оборудование, которое способно найти дефекты в сложных топологических слоях. Для этих целей был разработан алгоритм попиксельного сравнения соседних кристаллов, позволяющий находить дефекты

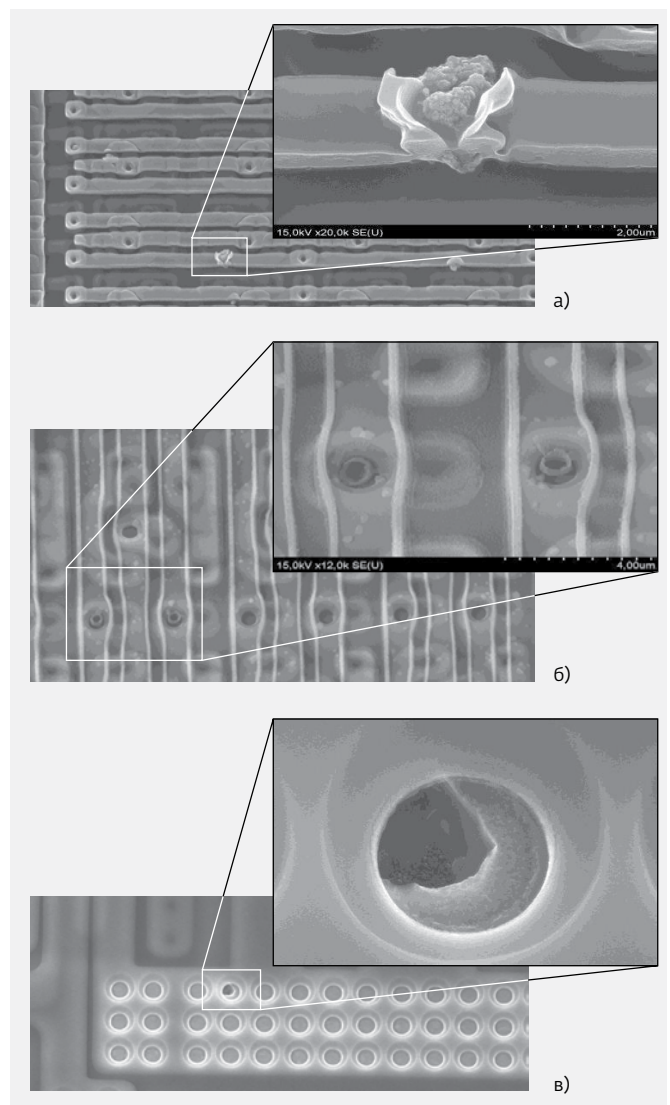


Рис.7. Некоторые виды дефектов: а – привнесенные дефекты; б – дефект в результате некачественного выполнения технологической операции; в – дефект, возникающий вследствие изменения (отклонения от нормы) параметров технологического процесса



Рис.8. Установка автоматического контроля микродефектов на пластинах с топологией ЭМ-6429Б

в очень насыщенных топологиях со значительными оптическими искажениями.

Определение самых разных дефектов – сложная научная работа (рис.7а, б, в). Предложенная КБТЭМО методика и созданная оптико-механическая система (рис.8) позволяют реализовать разработанные алгоритмы, то есть потребителю предоставляется инструмент для улучшения технологических операций и повышения качества продукции. Установка обнаруживает:

- локальные дефекты, наличие посторонних частиц (пыль, остатки резиста и т.д.);
- нарушение целостности технологических слоев (царапины);
- искажение топологии (вырывы, выступы на краях элементов, разрывы элементов, перемычки т.д.).

Стратегия применения установки может быть любая (рис.9). Наши специалисты рекомендуют ее использовать для выходного контроля продукции после всех операций, в процессе выполнения которых возможно появление дефектов. Объем выборки контроля определяется исходя из стадии внедрения изделия и уровня достигнутого качества. Чем выше процент выхода, тем меньше выборка контроля. Результаты тестирования технологических процессов с разными проектными нормами приведены на рис.10а, б.

ПРЕЦИЗИОННАЯ ДВУСТОРОННЯЯ ЛИТОГРАФИЯ

По мере увеличения степени интеграции бывает недостаточно расположить элементы схемы с одной стороны подложки, поэтому создаются изделия, требующие выполнения прецизионной

фотолитографии с двух сторон подложки. При этом крайне важна привязка рисунка на непланарной (нижней) стороне к топологии на планарной (верхней) стороне. Иногда применение двусторонней литографии позволяет создать клон меток на непланарной стороне и тем самым предотвратить потерю меток от "зарастания" при эпитаксии, напылении металла, во время операций CVD (осаждение паров органического соединения).

На рынке оборудования представлены различные решения. Большинство зарубежных установок имеют опции, позволяющие совмещать непланарную сторону по меткам на планарной стороне. Данное оборудование стоит довольно дорого, а точность совмещения низкая – 2...5 мкм. Что делать, если уже создана линейка для односторонней литографии, а покупать еще одну установку с двусторонним совмещением накладно? В таком случае лучше всего воспользоваться установкой для формирования знаков на непланарной стороне ЭМ-5186 (рис.11).

Установка представляет собой настольный степер, который по программе, составленной инженером-оператором, обходит все метки на планарной стороне, зафиксирует их точные координаты, добавит поправочные коэффициенты, определенные во время периодической автоматической аттестации, и с высокой точностью (лучше, чем 0,3 мкм) создаст метку на непланарной стороне.

Столь высокая точность достигается благодаря простой и надежной оптической схеме установки и периодической (перед каждой экспонируемой пластиной) автоматической аттестации положения оптической оси установки.

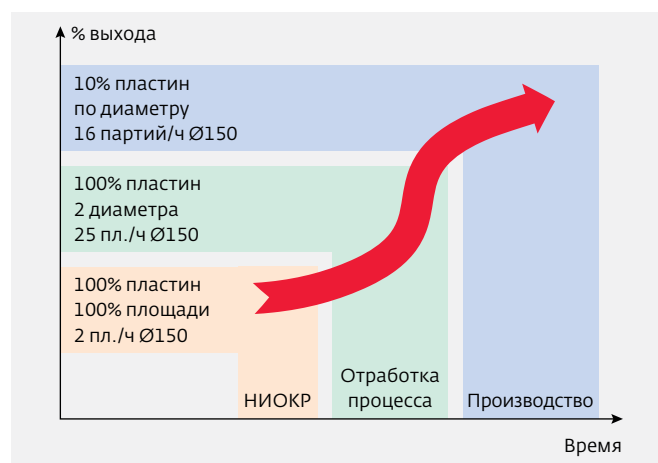


Рис.9. Рекомендации по применению установки ЭМ-6429Б

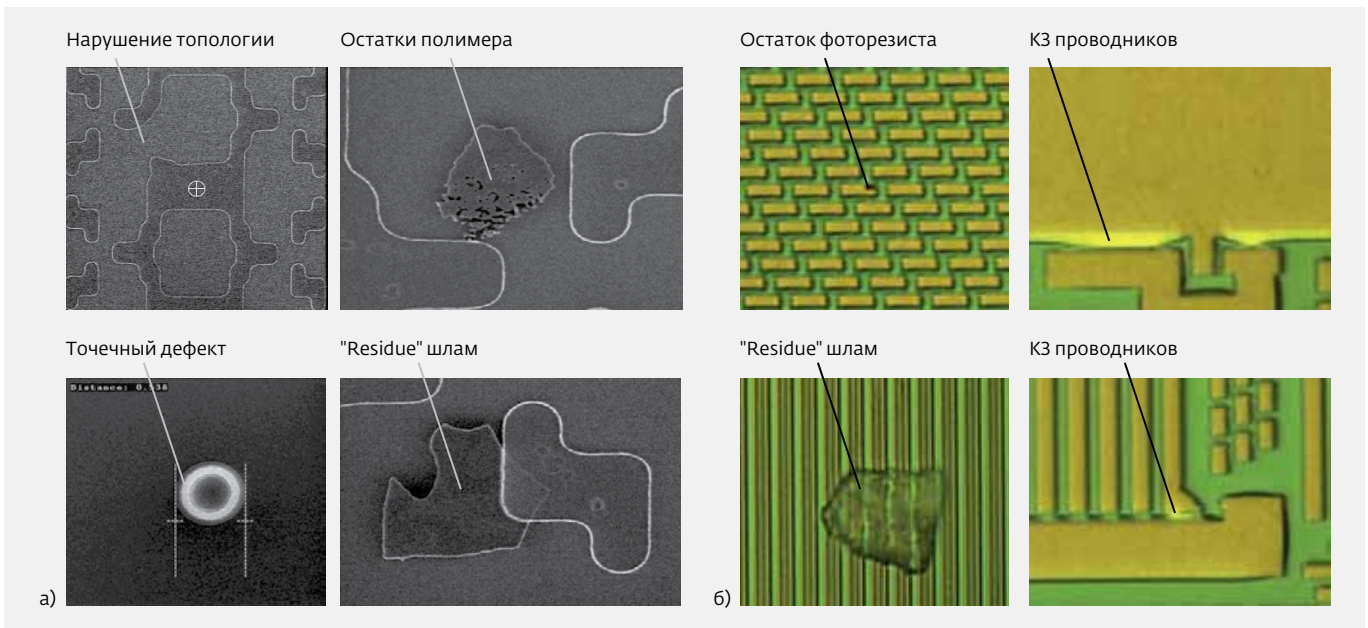


Рис.10. Результаты тестирования на установке ЭМ-6429Б пластин с разными проектными нормами: пластины КМОП 0,25 (а) и пластины КМОП 0,35 (б)

Таким образом, пополнив технологический набор оборудования для проведения односторонней фотолитографии установкой ЭМ-5186, можно создать участок фотолитографии, который реализует технологический процесс с двусторонним совмещением. При этом не имеет значения, какими установками совмещения вы пользуетесь (проекторной печатью, генератором изображений или контактной печатью; импортным или отечественным оборудованием). Установка позволяет работать с различными типами меток, автоматически определять их координаты. Типы подложек также не оказывают влияния на функционирование механизмов установки, которая адаптирована для работы в том



Рис.11. Установка для формирования меток на непла-нарной стороне ЭМ-5186

числе с прозрачными подложками. Максимальный размер подложек ограничен 200 мм.

Отсутствие ("0") дефектов на фотошаблоне (автоматический контроль и устранение дефектов)

Как бы ни хотелось всю продукцию изготавливать по безмасочной технологии, существует множество примеров применения масочной фотолитографии. Как правило, при массовом субмикронном производстве используются мультипликаторы (степперы) – установки с полем засветки 16 × 16 мм и более. Источником топологии для них служат фотошаблоны – металлизированные промежуточные оригиналы (МПО). На таком МПО в масштабе 5(4) : 1 создается топология целого модуля ИМС, который размещается на поверхности полупроводниковой пластины, размер модуля соответствует полю засветки. Поскольку на пластине может поместиться много модулей, понятно, что любой дефект на МПО будет размножен по пластине, и это приведет к браку большого количества кристаллов. Следовательно, согласно требованиям к качеству, МПО должны быть свободны от дефектов ("0" дефектов). Возникает вопрос, а какой дефект признается браком? Ответ можно найти в материалах ITPS (The International Technology Roadmap for Semiconductors). Для проектных норм от 0,35 мкм до 0,065 мкм браком считается дефект, размер которого составляет 20% от проектной нормы. Следовательно,



- ЭМ-6329Р**
- Совместима с технологической нормой 130 нм
 - Твердотельный источник света на i-линии
 - Контроль методом сравнения с проектными данными
 - Высокая производительность

- ЭМ-6729**
- Совместима с технологической нормой 90 нм
 - Твердотельный лазер 266 нм
 - Контроль методом сравнения с проектными данными
 - Режим фазового контраста
 - Высокая производительность



Рис.12. Установки для контроля фотошаблонов: ЭМ-6329Р (а) и ЭМ-6729 (б)

на МПО (5 : 1) необходимо исключить дефекты размером, равным проектной норме. Для решения этой сложной технической задачи в КБТЭМ-ОМО разработаны два типа установок: автоматического контроля топологии фотошаблонов и лазерного устранения дефектов.

Установки автоматического контроля обеспечивают поиск дефектов путем сравнения изображения на МПО с исходными данными в конструкторском проекте (рис.12). Полученные отклонения математически обрабатываются, составляется таблица, в которой приводятся только дефекты, соответствующие критериям отбраковки, и указываются их координаты. Установка позволяет оператору проанализировать на экране монитора каждый обнаруженный дефект и дать экспертную оценку. Таким образом, первый этап создания бездефектных МПО выполнен – дефекты обнаружены, определены их координаты.

На втором этапе необходимо устранить дефекты, но так, чтобы не допустить новых. Для этого изготавливаемый МПО передается на установку лазерного устранения дефектов (рис.13). При создании бинарных фотошаблонов дефекты могут быть двух видов: прозрачные и непрозрачные. В предлагаемой технологии непрозрачные дефекты удаляются лазерным излучением (способом абляции), при этом для субмикронных МПО рекомендуется применение фемтосекундного лазера, который не повреждает поверхность кварцевой или стеклянной заготовки. Прозрачные дефекты "залечиваются" путем осаждения паров металлоорганического



- ЭМ-5001В**
- Пикосекундный лазер
 - Размер минимального элемента 0,5 мкм
 - Максимальный размер шаблона 7×7 дюймов

- ЭМ-5131**
- Фемтосекундный лазер
 - Размер минимального элемента 0,2 мкм
 - Максимальный размер шаблона 7×7 дюймов



Рис.13. Лазерные установки для устранения дефектов фотошаблонов: ЭМ-5001В (а) и ЭМ-5131 (б)

вещества (CVD), активированного лазерным излучением. В установках производства нашей компании реализованы оба метода. Это позволяет устранить все дефекты в рамках одного технологического процесса, на одной установке, что значительно снижает затраты.

Данный комплект оборудования позволит дополнительно:

- проверить комплект шаблонов, изготовленный на зарубежной фабрике, и гарантировать отсутствие "закладок";
- создать электронный образ неизвестного фотошаблона;
- провести подгонку топологии корректирующих элементов топологии на фотошаблоне;
- обеспечить корректировку топологии шаблона после проведения опытной партии для проверки результатов предварительного анализа;
- удалить специально сделанные "закладки" в топологии на стадии разработки проекта для маскирования своих ноу-хау;
- выполнить корректировку топологии опытных образцов изделий после их изготовления.

В данной статье рассмотрены только некоторые инновационные идеи, получившие широкое распространение в последнее время. Более полная информация о разработках ОАО "КБТЭМ-ОМО" доступна на сайте <http://kb-omo.by> или по телефону: +375 172 392 2406.

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

