

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МИКРОДЕФЕКТНОСТИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИНАХ

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

Производство микросхем – сложный технологический процесс. Для получения предельных характеристик необходимо осваивать субмикронные нормы. Большинство предприятий усиленно внедряют новые технологии, не отдавая себе отчет в том, какие новые вызовы их ожидают, например дефектность. Когда ИМС производились по микронной технологии (и даже по 0,8 мкм), дефекты, которые могли повлиять на качество продукции, исчислялись в единицах. С переходом на субмикронные технологии количество дефектов растет экспоненциально, и для проектной нормы 0,35 мкм их уже тысячи на чистой подложке. Рассмотреть дефекты такого размера под микроскопом в видимом свете невозможно. Не вдаваясь в теоретические аспекты, заметим, что для этого потребуются жесткий ультрафиолет (UV, DUV) либо растровый электронный микроскоп (РЭМ), что в большинстве случаев неприемлемо при контроле дефектов на производстве в рабочем цикле. Установка ЭМ-6429 для автоматического контроля микродефектов на пластинах с топологией, предлагаемая КБТЭМ-ОМО (Республика Беларусь, Минск), позволит решить многие проблемы, возникающие при изготовлении микросхем субмикронных размеров.

Контроль дефектности полупроводниковых пластин при массовом производстве – очень трудоемкая работа. Как правило, выполнение процедуры доверяют лучшим операторам, использующим лучшие микроскопы. Но если такой подход приемлем при контроле пластин с микронными проектными нормами, то для производства субмикронных изделий он не подходит. Например, при увеличении 120 крат поле зрения в микроскопе составляет 1,2 мм (площадь 1,13 мм²), а при 1000× – 0,23 мм (площадь 0,05 мм²). При изменении кратности увеличения микроскопа в 8,3 раза площадь поля контроля микроскопа уменьшается в 22,6 раза, что эквивалентно снижению производительности труда оператора во столько же раз.

ЧТО ДАЕТ УВЕЛИЧЕНИЕ?

Обеспечивает необходимую разрешающую способность человеческого глаза при контроле.

Для справки. Человеческий глаз представляет собой естественную оптическую систему, характеризующуюся определенным разрешением, то есть наименьшим расстоянием между элементами наблюдаемого объекта (воспринимаемыми как точки или линии), при котором их еще можно отличать один от другого. Для нормального глаза при удалении от объекта на так называемое расстояние наилучшего видения ($D = 250$ мм) среднестатистическое нормальное разрешение составляет 0,176 мм.

Источник: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Микроскоп>

Из теории оптики известно, что для каждой длины света есть минимальный элемент, который может быть разрешен. Он связан с длиной волны следующей формулой:

$$L_{\min} = 0,61 \frac{\lambda}{A_p},$$

где L_{\min} – минимальный разрешаемый элемент; λ – длина волны (для видимого света равна 555 нм); A_p – апертура объектива. Стоит заметить, что высококачественный объектив (не иммерсионный) трудно изготовить с апертурой более 0,95.

Минимальный разрешаемый элемент в области видимого света составляет 356 нм. Теперь оценим максимальное увеличение микроскопа, улучшающее реальную разрешающую способность глаза. Для этого нормальное разрешение глаза (0,176 мм) разделим на минимальный разрешающий элемент (356 нм) для данной длины света. В результате увеличение составит ~500 крат. Микроскопы с большим увеличением (например, 1000 крат) не повышают разрешение глаза, а только увеличивают предмет без улучшения видимости деталей изображения. Аналогом служит цифровой зум, когда для увеличения размеров изображения просто увеличивают размер пикселя.

Чтобы определить, для каких проектных норм подходит микроскоп с текущим разрешением, необходимо понимать, что требуется подробно рассмотреть на элементе трех-пяти деталей с разрешением оптической системы. Таким образом, микроскоп с увеличением 500× в области видимого света позволяет контролировать технологические слои с проектной нормой 1,0 мкм, а с увеличением 1000× – изделия той же проектной нормы.

Для увеличения разрешения (см. формулу) надо снижать длину волны (рис.1), при которой проводится наблюдение изображения.

Наиболее простое (экономичное) решение – смещение в область фиолетового излучения с длиной волны 390 нм, при этом разрешение увеличится, что позволит контролировать элемент размером 250 нм. Конечно, радикальный переход в область УФ-излучения требует использования более дорогостоящих источников света, марок оптического стекла и ПЗС-матрицы.

В процессе наблюдения в поле микроскопа многие особенности изделия различимы благодаря

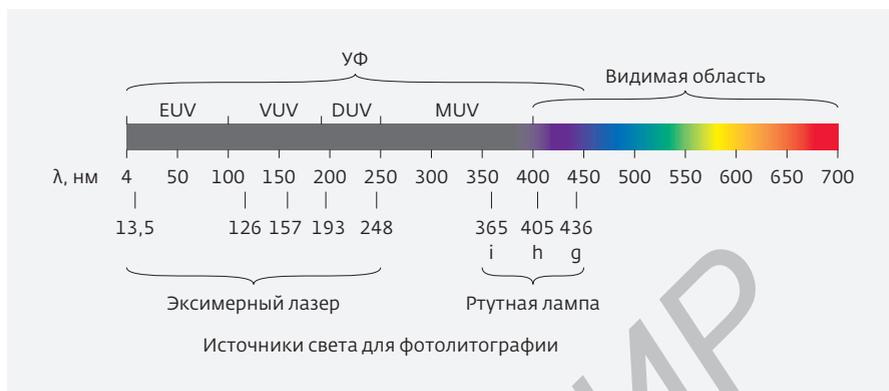


Рис.1. Спектр видимого света и УФ-излучения

игре цвета, то есть интерференции, которая может возникнуть в широком интервале светового спектра. Если искусственно ограничить спектр наблюдения, значительная часть информации об объекте будет утрачена. Поэтому важно осуществлять контроль во всем видимом спектре – от фиолетового до красного света.

Многие аналогичные установки для подсветки предмета анализа оснащены источником света на кварцевой лампе. В установке автоматического контроля микродефектов ЭМ-6429 применяется светодиодная подсветка. Сравнение стоимости конструктивного решения и эксплуатационных затрат для кварцевой лампы и мощного светодиода приведено в таблице.

Применение светодиодного источника света не увеличивает стоимость установки, но позволяет на порядки снизить эксплуатационные расходы.

Важным фактором, влияющим на качество контроля, является наличие системы автоматически поддерживаемой фокусировки. При увеличении в 1000 крат глубина фокуса для лучших объективов составляет около ±0,3 мкм, что меньше рельефа микросхемы на стадии создания активной области с проектными нормами 0,8 мкм (например, Locos 0,4 мкм + ПКК 0,25 мкм + 1 Me 0,6 мкм = 1,25 мкм). К сожалению, качество полупроводниковых подложек далеко от идеального: клин 3–4 мкм на длине 16–20 мм считается хорошим результатом. Нельзя забывать и о качестве оснастки, на которой размещена пластина в момент контроля. Качество столиков для пластин не лучше качества полупроводниковой пластины, то есть клин 3–5 мкм на длину 20 мм. Следовательно, применять микроскоп с увеличением 500× (а тем более 1000×) без автофокусировки в реальных условиях невозможно, тем более контролировать дефектность пластин при серийном производстве.

Таблица. Сравнение стоимости и эксплуатационных затрат различных конструктивных решений

Элементы системы подсветки	На ртутной лампе мощностью 11 Вт	На светодиодах
Стоимость, долл.		
Лампа	25	300
Фильтр	350	–
Источник питания	50	50
Детектор	5	5
Теплоизоляционная камера	150	–
Всего	580	355
Эксплуатационные расходы за пять лет, долл.		
Потребление энергии*	58	2
Замена лампы через 500 ч работы**	1375	–
Установка и наладка лампы	275	–
Всего	1708	2

* Стоимость электроэнергии 0,12 долл./кВт·ч.

** Цена лампы 25 долл.

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ

Человеческий глаз и мозг – самая мощная универсальная машина, которая позволяет проанализировать изображение и выбрать информацию, необходимую для принятия решения по требуемым критериям. Но как человека заменить машиной? Каждый, кто контролировал пластины через микроскоп, знает, насколько они различаются даже внутри одной партии. Допуски на толщину технологических слоев приводят к изменению цветовой расцветки в одних и тех же слоях пластины и в партии пластин. В результате покрытия рельефа прозрачными (или полупрозрачными) слоями возникает интерференция, которая придает им разный цвет, а оптическое преломление искажает видимое изображение. Допуски на линейные отклонения размеров, цветовая гамма – все это приводит к тому, что невозможно создать электронный эталон изображения, как при контроле фотошаблона, и с ним сравнивать текущее изображение кристалла.

Но с другой стороны, групповая обработка кристаллов на пластине позволяет с высоким уровнем воспроизводимости изготовить рядом расположенные элементы конструкции. Можно предположить, что размеры элемента, цветовая гамма, искажения одинаковых областей соседних кристаллов будут очень и очень близкими. Сравнивая попиксельно

рядом расположенные кристаллы, можно выявлять не допустимые различия, а существенные искажения, признаваемые дефектами. Данный метод контроля получил название попиксельного сравнения соседних кристаллов (Chip to chip), а его разновидность – попиксельного сравнения соседних ячеек регулярных структур (Cell to cell). В данном методе контроля эталон постоянно меняется – "скользит по подложке", подстраиваясь под текущую ситуацию. Реализация данного метода требует прецизионной точности механики, оптики, высокоточных перемещений стола, контролируемых интерферометрами, постоянной синхронизации поступающей информации и ее интеллектуальной обработки.

Еще одна важная особенность процесса контроля подложек – тип освещенности при контроле непрозрачных подложек. Возможны два типа подсветки: в отраженном вертикальном свете (светлое поле) или в косом свете (темное поле). Каждый тип освещения имеет свои преимущества и недостатки.

Темное поле позволяет получить черно-белое очень контрастное изображение. Яркость светлых пятен будет пропорциональна величине неровности (дефекта) на пластине (рис.2). Такое изображение просто обрабатывать программными средствами, так как для его анализа требуется бинарная обработка видеосигнала, сигнал можно значительно усилить, не боясь появления шумов.

Библиотека БГУИР

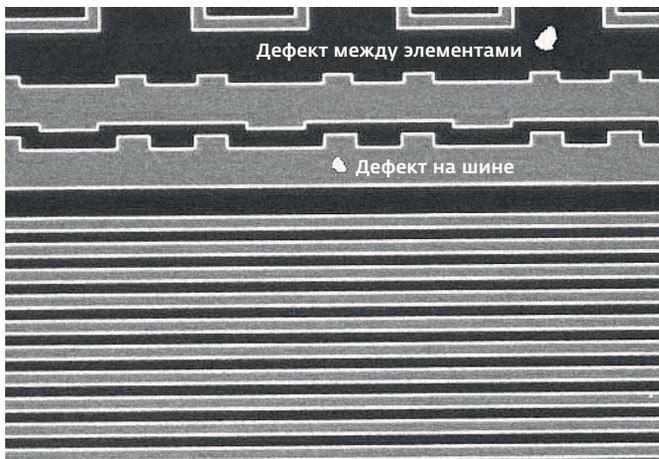


Рис.2. Изображение пластины в темном поле

Оборудование для контроля в темном поле дешевое и производительное.

Что касается недостатков контроля в темном поле, то дефекты, расположенные в углублениях (рис.3), не будут излучать свет, а дефекты на рельефе будут маскироваться отраженным от рельефа сигналом. Дефектов, которые выявляются интерференцией, также неразличимы. Следовательно, большую часть дефектов система не обнаружит, пропустит по маршруту дальше, что приведет к предсказуемому результату – выпуску бракованной продукции.

Светлое поле. Обнаруживать все видимые дефекты можно, если выполнять контроль в отраженном свете видимого широкополосного диапазона. Источник света должен иметь спектр от фиолетового до красного. Область фиолетового света позволит определять разрешающую способность установки, а остальных цветов – выявлять дефекты, которые контрастны только в своей области спектра. Анализ и обработка таких изображений значительно сложнее и дороже, но результат – полная информация о дефектности пластины – того стоит.

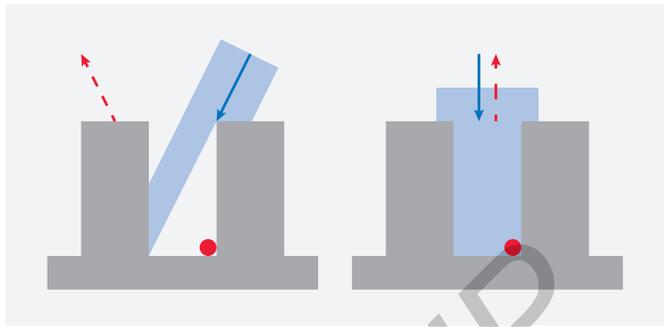


Рис.3. Дефекты контактов не видны в темном поле и видны в отраженном свете

ЧТО ОПРЕДЕЛЯЕТ УСТАНОВКА АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МИКРОДЕФЕКТНОСТИ ЭМ-6429?

Установка тестировалась на подложках диаметром 150 мм, которые были изъяты из технологического процесса CMOS 0,35 мкм после операций: "Плазмохимическое травление поликремния" (и снятия фоторезиста); "Плазмохимическое травление металла" (и снятия фоторезиста); "Фотолитография "Резистор" (фоторезист не удался). Изъятые с текущего производственного маршрута пластины проходили полный технологический контроль и были признаны годными.

Первыми проверялись пластины с поликремнием. При визуальном их осмотре была обнаружена высокая радужность поликремния. Тем не менее, контроль проводился в отраженном свете, что позволяло выявлять все дефекты, в том числе расположенные рядом с вертикальными структурами и в глубоких "колодцах". При контроле в темном поле они не фиксируются. Проблемы с радужностью были легко преодолены и в результате выявлены дефекты, связанные только с нарушением геометрических размеров (рис.4). На фотографиях видно, что дефекты обнаружены как в структурах

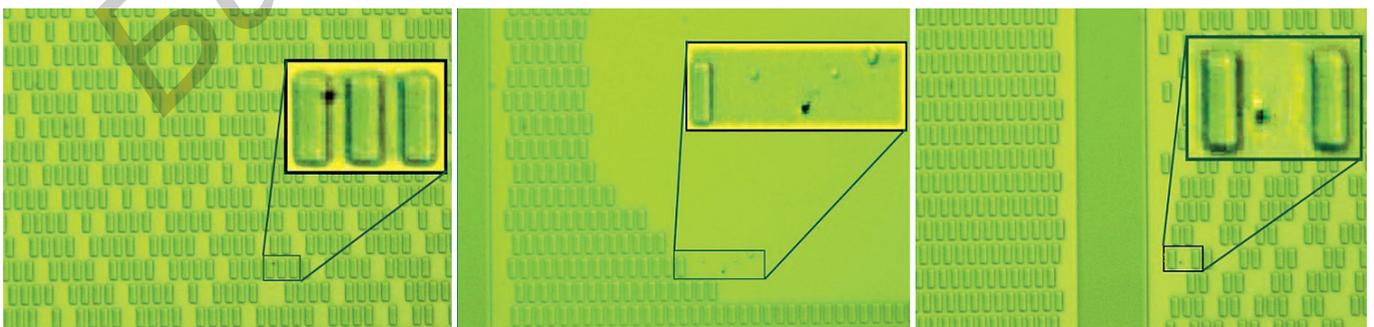


Рис.4. Дефекты, обнаруженные в процессе контроля пластин после операции "ПХТ поликремния" со снятым фоторезистом

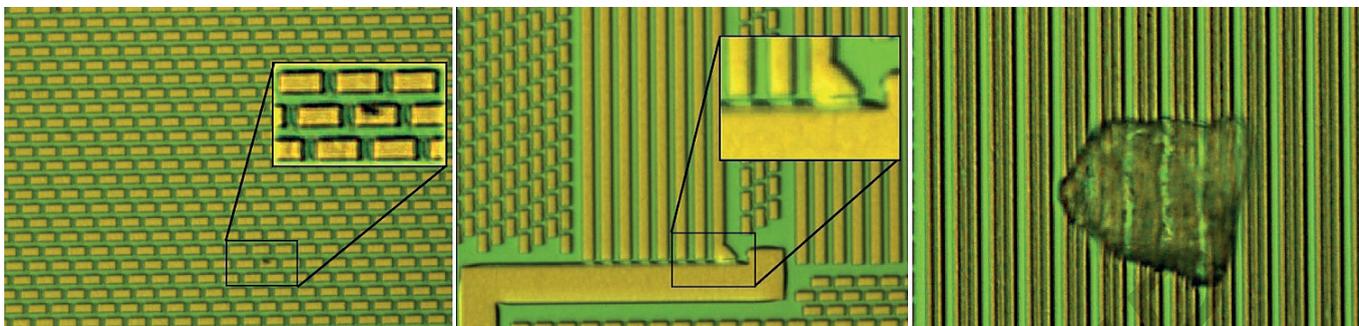


Рис.5. Дефекты, обнаруженные в процессе контроля пластин со снятым фоторезистом после операции "Плазмохимическое травление металла"

с высокой плотностью топологии, так и на открытых площадях.

Контроль пластин после операции "Плазмохимическое травление металла" показал высокую чувствительность системы к неровностям (бугоркам) на поверхности металла. Фактически каждый бугорок на алюминии воспринимался установкой как дефект. Чтобы избежать подобных проблем, в установку встроили алгоритм создания дополнительной маски металлизации. Дополнительный слой, который формируется автоматически на основе анализа топологии пластины, позволяет в процессе контроля изменять порог чувствительности при выходе на элементы топологии, имеющие неровности. После введения дополнительной маски в процесс контроля пластин по окончании операции "Плазмохимическое травление металла" его результаты стали приемлемыми (рис.5). При этом порог чувствительности

после введения дополнительного слоя увеличился настолько, что неровности слоя металлизации маскируются, но выявляются дефекты, которые могут появляться на поверхности металла.

Помимо формирования маски металлизации, программное обеспечение позволяет создавать маски кристалла и контроля. В первом случае из процесса контроля можно исключить крайние дорожки, а во втором – отдельные области кристалла. Это полезно для случаев, когда в контрольной карте для некоторых областей пластины не нормируется дефектность.

"Испытанием" для установки стал процесс контроля пластин после операции "Фотолитография Резистор" без удаления фоторезиста. Данные пластины представляли собой подложки с вытравленными структурами, покрытыми островками фоторезиста, который при толщине в ~1 мкм заполнял собой части структур. Визуально это пластина с отдельными элементами в зоне резкости (рис.6). В данном случае в полной мере проявил себя метод контроля попиксельного сравнения соседних кристаллов.

Для контроля данным методом не имеет значения, находится изображение в зоне резкости или нет. Установка одинаково хорошо находит дефекты

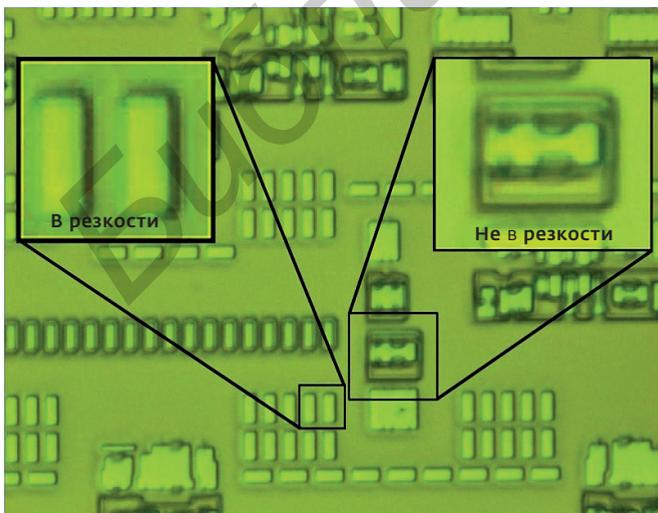


Рис.6. Пластина после операции "Фотолитография Резистор" без удаления фоторезиста

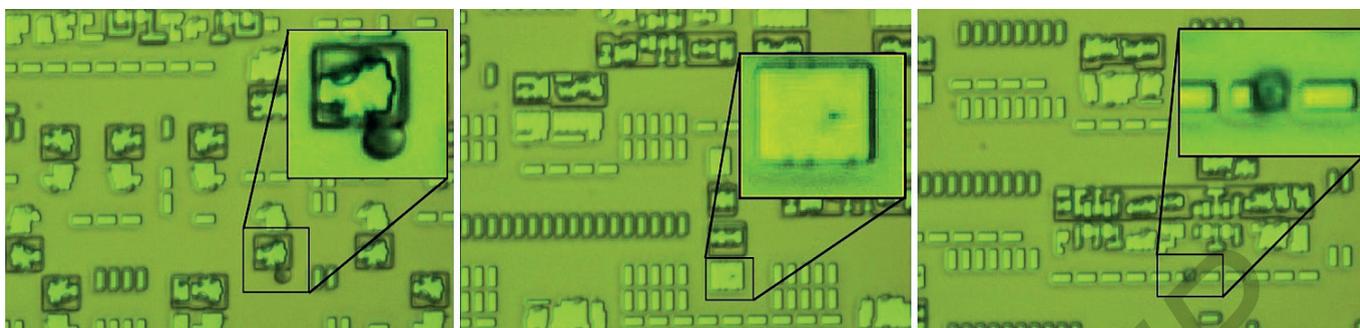


Рис.7. Дефекты, обнаруженные в процессе контроля пластин после операции "Фотолитография "Резистор" без удаления фоторезиста

во всех областях, что позволяет фиксировать дефекты не только в верхних слоях, но и в нижележащих, которые, как правило, всегда вне зоны резкости. Результаты контроля пластин после операции "Фотолитография "Резистор"" без удаления фоторезиста приведены на рис.7.

КАК ЛУЧШЕ РАСПОРЯДИТЬСЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ УСТАНОВКОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МИКРОДЕФЕКТНОСТИ ЭМ-6429?

Самое простое – встроить ее в технологический процесс и браковать продукцию, не соответствующую критериям карты контроля. Но правильно ли это? Конечно, такой способ подходит для производства штучных изделий максимально возможного уровня надежности. Но лучше использовать установку для контроля технологического процесса и настройки оборудования, а по результатам контроля принимать решение о готовности процесса или

необходимости корректировки либо даже оптимизации технологического процесса.

Как уже отмечалось, установка подходит для автоматического контроля дефектности после выполнения всех операций технологического маршрута и для пластин различных топологий. **Это первый вариант применения установки.**

Производительность установки контроля в первую очередь определяется быстродействием используемой ПЗС-матрицы. Самые быстрые ПЗС-матрицы позволяют достичь производительности установки около 10 мм²/с или 36 000 мм²/ч при контролируемом пикселе 0,25 мкм. Это позволяет в течение часа проверить четыре пластины \varnothing 100мм или две пластины \varnothing 150мм.

Как быть, если производительность контрольной установки уступает производительности производственной линии? Регулировать объем контроля (рис.8). В микроэлектронике большинство операций выполняется групповым методом, что позволяет после завершения технологической операции осуществлять выборочный контроль пластин. На пластине можно контролировать не всю площадь, а лишь часть, например, два столбца кристаллов по диаметру (отработка процесса, зеленый цвет). Это позволяет значительно сузить выборку контроля, но при этом получить полную картину настройки технологического процесса и оборудования. Следует придерживаться правила: чем выше процент выхода, тем меньше объем выборки при контроле.

После контроля обязательная процедура – анализ дефектов. Если распределение дефектов по количеству и типу соответствует установленным требованиям, на этом анализ можно и закончить.

Но если дефектность превышает допустимый уровень, в технологическом процессе необходимо детально проанализировать каждый дефект.

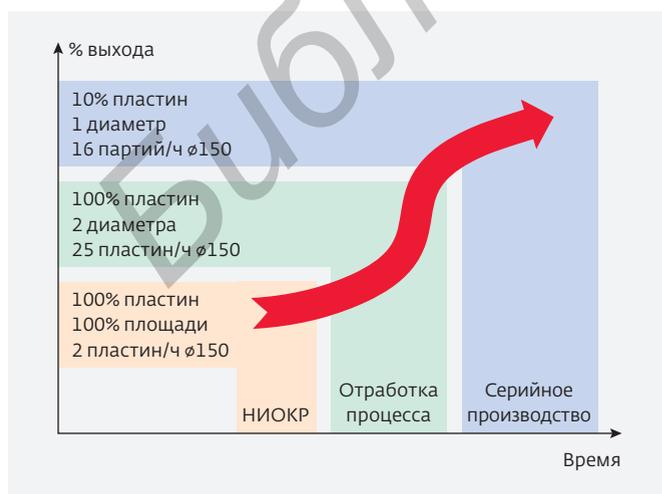


Рис.8. Стратегия контроля пластин на установках автоматического контроля микродефектов

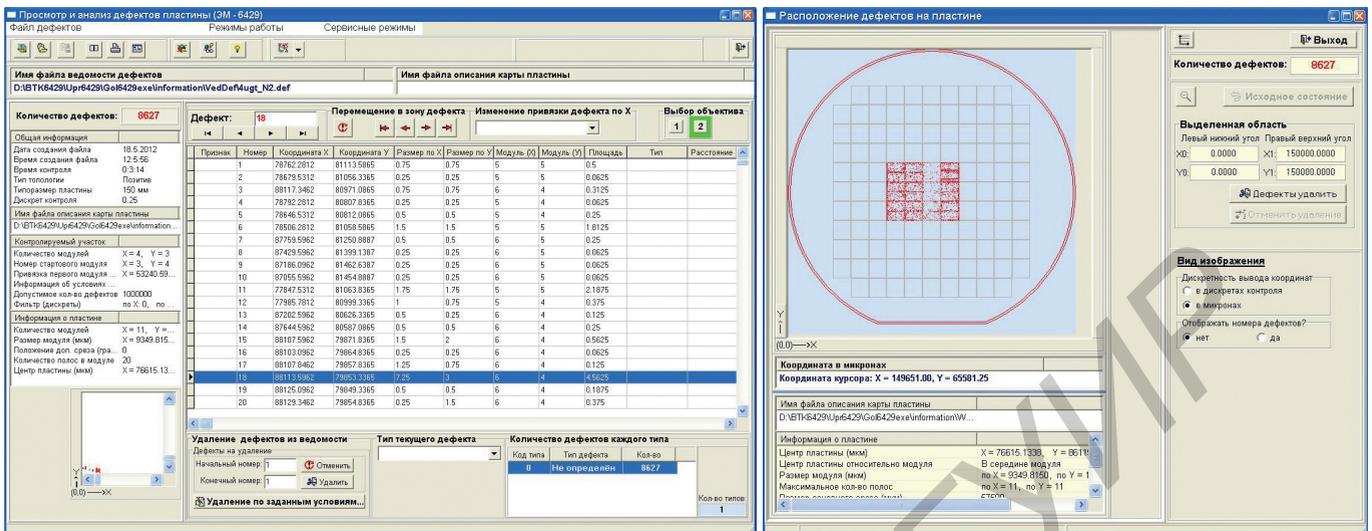


Рис.9. Результаты контроля микродефектности на установке ЭМ-6429

Для этого результаты контроля представляются в виде таблицы дефектов и карты расположения дефектов на пластине (рис.9).

Предварительная обработка дефектов проводится на стадии контроля. Дефекты, расположенные рядом, объединяются в один, что позволяет значительно уменьшить количество

дефектов при анализе. Дефекты, включенные в таблицу, могут быть ранжированы по площади, из рассмотрения исключаются дефекты определенных размеров (т.е. с заранее известными признаками). Карта распределения дефектов позволяет наглядно представить, как они размещены на подложке, и таким образом установить



Рис.10. Установка контроля микродефектности ЭМ-6429

закономерности, связанные с их пространственным расположением.

Выбрав определенный дефект из таблицы, установка автоматически продемонстрирует его на экране монитора обзорного канала. Два объектива в обзорном канале с оптическим увеличением 170× и 500×, цифровой зум, освещение в светлом или темном поле, проход по глубине фокуса, вывод на печать или в файл позволяют выполнить предварительный анализ дефекта. Если этого недостаточно, пластину вместе с файлом дефектов в формате KLR можно загрузить в установку экспертного визуального контроля или растровый электронный микроскоп и провести профессиональный анализ. Как правило, установки контроля работают с форматом KLR, поэтому не будет проблем с поиском анализируемого дефекта, что значительно снизит нагрузку на оператора. По результатам анализа разрабатывается план корректирующих действий. Повышение качества продукции по мере выполнения корректирующих действий – главный результат использования установки ЭМ-6429.

Второе важное применение установки – выходной контроль продукции (finish optical control – FOI), когда необходимо гарантировать отсутствие в ней дефектов. Сегодня известны два фактора, которые требуют такого контроля для изделий с высокой гарантированной надежностью. Первый – экономический. Металлокерамический корпус для изделий стоит дороже или столько же, как и кристалл. Второй – методы отбраковки на надежность носят вероятностный характер

и не позволяют исключить все потенциально ненадежные приборы, тем более отбраковка проводится за счет снижения ресурса изделия. Таким образом, чем меньше дефектов имеет кристалл, который подвергается корпусированию, тем надежнее готовое изделие. Для этих целей контролируется внешний вид каждого годного по функционалу кристалла, и только затем они передаются на сборку, что гарантирует надежность ИМС.

Установка состоит (рис.10) из оптико-механического устройства (проекция на полу 121×870 мм), стойки управления (800×600 мм) и управляющего комплекса (1400×800 мм). Стойку управления допускается размещать вне чистой зоны. Оптико-механическое устройство укомплектовано блоком загрузки-выгрузки и ориентации для подложек диаметром 100–150 мм. Перестройка механизмов не требуется. Оператор может запрограммировать работу установки как с одной кассетой – по принципу "где взял, туда вернул", так и с двумя.

* * *

Для эксплуатации установки требуется обеспечить чистое помещение не ниже класса 5 ИСО по ГОСТ ИСО 14644-1-2002, поддержание температуры в пределах от 20 до 24°С, при относительной влажности от 40 до 60%. Наличие агрессивных газов и паров кислот в помещении недопустимо. Предельные значения амплитуды виброперемещений основания, на которое устанавливается оптико-механическое устройство, не должны превышать 5 мкм на частоте до 10 Гц. Питание установки осуществляется от однофазной сети переменного тока с номинальным напряжением 230 В и частотой 50 Гц, потребляемая мощность – не более 1,5 кВт. Для эксплуатации установки требуется обеспечить подачу в установку сжатого воздуха под давлением 0,4 МПа (объемный расход – не более 1 м³/ч) и подключение к вакуумной магистрали с остаточным давлением от 0,02 до 0,04 МПа.

Более полная информация о разработках компании доступна на сайте <http://kb-omo.by> или по телефону: +375 17 392 2406.

В заключение призываю специалистов, представляющих предприятия радиоэлектронной промышленности, больше доверять отечественным производителям оборудования и тем самым стимулировать их к новым более сложным разработкам. ●