

теля степени n , учитывающего влияние реальной формы приконтактной области частицы порошка.

Выражение (25) устанавливает зависимость величины относительного контактного сечения α_k от относительной плотности прессовки. Определяющей деформационный механизм уплотнения порошкового тела, включающего в себя все три возможные компоненты деформации: упругую, пластическую и структурную или межчастичную. От выражения (2.83) работы [1] выражение (25) отличается наличием показателя степени n , учитывающего влияние реальной формы приконтактной области частицы порошка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.М.Жданович. Сопротивление порошковых материалов. 1999.-с.46. ПК ООО «Беспринт» г. Минск. 2. М.Ю.Бальшин. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. 1972. с.63. Металлургия. Москва.

УДК 621.313.04

Аваков С.М.

ОБНАРУЖЕНИЕ ИЗОЛИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ОРИГИНАЛОВ ТОПОЛОГИИ НА ФОТОШАБЛОНАХ

*Государственный научно-производственный концерн
точного машиностроения «Планар»*

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость точного определения вероятности обнаружения дефектов заданного размера обусловлена двумя причинами. Во первых, необходимо гарантировать определённую вероятность обнаружения дефектов на уровне порога обнаружения установки и, тем самым, подтверждать один из её основных параметров, а, во-вторых, необходимо определять обнаружительную способность для дефектов, имеющих размеры, меньшие порога обнаружения.

Так например, для установки, имеющей порог обнаружения на уровне 0,25 мкм с вероятностью 0,95, необходимо, с одной стороны, подтвердить эту вероятность для дефектов с размерами 0,25 мкм, а, с другой стороны, определить вероятность обнаружения дефектов с меньшими размерами - 0,20 мкм, 0,15 мкм, которые обнаруживаются, соответственно, с меньшей вероятностью. Определение этих вероятностей является важным потому, что при формировании ведомости дефектов, после завершения автоматического контроля, в неё включаются не только дефекты с заданными размерами, но и дефекты с меньшими размерами, которые, как правило, не являются критичными. При этом дефекты с размерами проекций на координатные оси, меньшими размера элемента разложения изображения (пиксела), идентифицируются как дефекты размером один пиксел. Для уточнения этих размеров используется специальный режим повторного сканирования обнаруженных дефектов с высоким интерполяционным разрешением, который позволяет отфильтровывать не критичные дефекты за счёт получения более точных оценок их размеров. Несмотря на то, что повышение обнаружительной способности оборудования является одной из основных задач на пути его совершенствования, в данном случае это пагубно влияет на характеристики системы, т.к. дефекты, меньшие порога обнаружения, считаются ложными и ухудшают параметр системы, связанный с вероятностью обнаружения ложных дефектов. Количество таких дефектов может оказаться существенным на общем фоне ложных дефектов различных типов (рис.1).

Снижение количества ложных дефектов является одной из основных целей при создании оборудования для автоматического контроля оригиналов топологии [1,2], что определяет

актуальность исследования причин появления ложных дефектов и методов определения вероятности их появления.

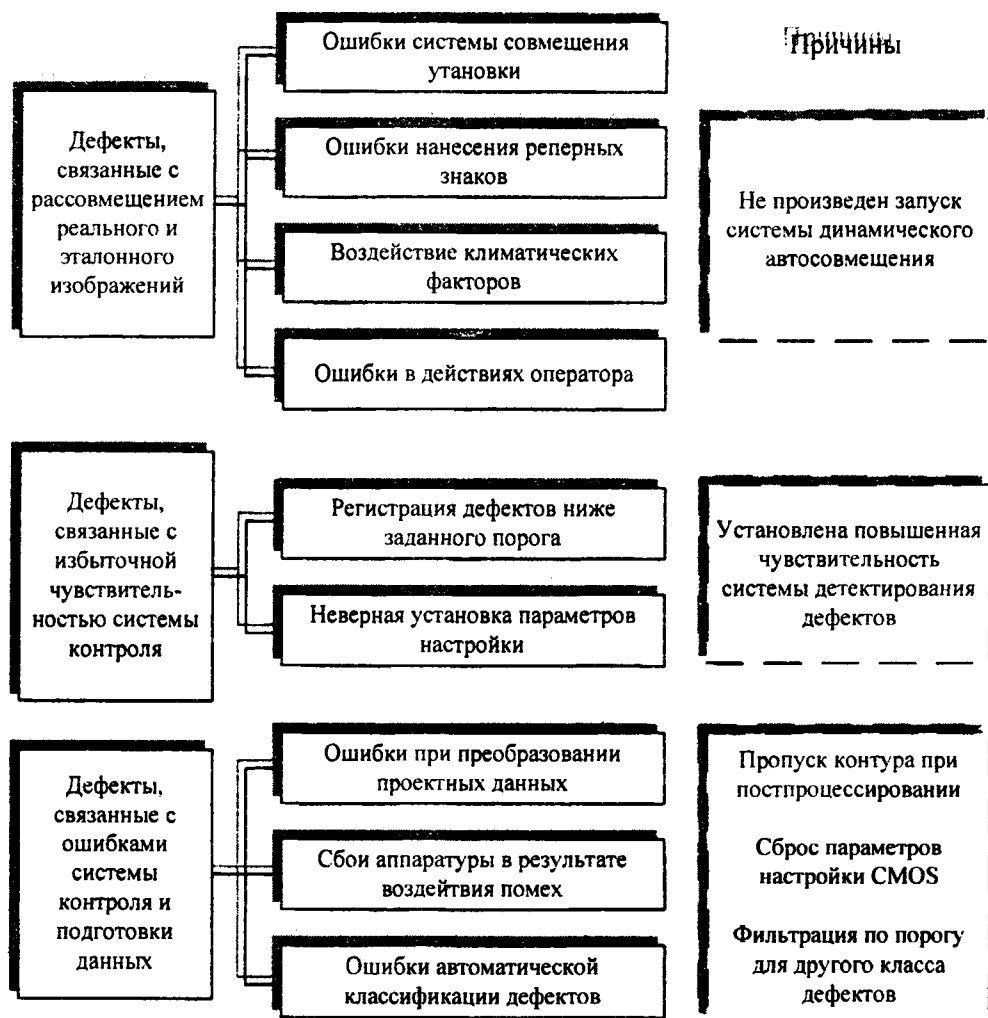


Рис. 1. Классификация источников происхождения ложных дефектов

При определении вероятностей обнаружения дефектов различного размера приходится производить дорогостоящих испытания большого объёма, поэтому важным является определение точного числа испытаний, гарантирующего определение этих вероятностей.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБНАРУЖИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ

Возможность обнаружения дефектов с размерами, меньшими порога обнаружения, обусловлена тем, что разрешение оптической системы установки автоматического контроля топологии для элементов с размерами, меньшими паспортного разрешения, меняется плавно, без порогового эффекта. В табл. 1 приведены частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) двух объективов – с разрешением 0,5 мкм, апертурой $NA=0,5$ и с разрешением 0,25 мкм, апертурой $NA=0,75$. Из таблицы видно, что элементы изображения с размерами, меньшими, чем разрешение объектива, воспроизводятся с меньшим контрастом, что до определённого предела не мешает их обнаружению при автоматическом контроле топологии при определённой настройке системы детектирования дефектов.

Например, объектив с апертурой $NA=0,5$ разрешает элементы до 0,3 мкм включительно, хотя и с меньшим контрастом. С учётом спектральной чувствительности используемой ПЗС это приводит к обнаружению при определённых вариантах совмещения сетки дискретизации установки с координатной сеткой фотошаблона дефектов с размерами до 0,35 мкм. Примеры регистрации дефектов с размерами меньше порога обнаружения показаны на рис. 2.

Для объектива с апертурой $NA=0,75$ с некоторой вероятностью обнаруживаются дефекты с размерами до 0,19 мкм. Аналогичные соотношения имеют место и для объектива с

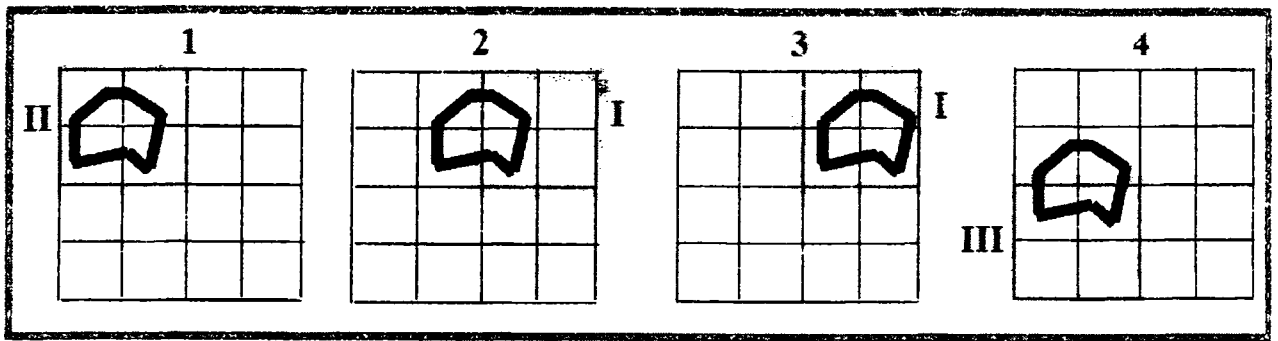


Рисунок 2 - Примеры регистрации дефектов с размерами меньше порога обнаружения

разрешением 0,15мкм, но в силу отсутствия экспериментальных результатов эти данные не приводятся.

При испытаниях оборудования для автоматического контроля топологии одной из основных является задача экспериментального определения обнаружительной способности. Для этого обычно производится некоторое количество циклов сканирования специально изготовленного и аттестованного тестового шаблона, в результате чего подтверждается вероятность обнаружения дефектов разных типов и размеров. Количество циклов сканирования при этом определяется, как правило, эвристическим путём. Наиболее сложным в этом случае является определение вероятности обнаружения дефектов с линейными размерами, соответствующими границе чувствительности установки. Предлагаемая методика определения вероятности обнаружения таких дефектов, основана на точном расчёте необходимого количества циклов сканирования для подтверждения чувствительности с заданной вероятностью. Следует отметить, что при этом необходимо уточнение определения дефекта заданного размера. Необходимость такого уточнения обусловлена тем, что обнаружительная способность установки автоматического контроля топологии зависит не только от линейных размеров дефекта, но и от его пространственного распределения, вследствие чего определение размера дефекта и, соответственно, размера минимального обнаруживаемого дефекта только через линейные размеры является неоднозначным. Этот вопрос решается путём стандартизации формы дефектов тестового шаблона и определения обнаружительной способности установки для дефектов фиксированной формы.

Таблица 1. Частотно-контрастные характеристики объективов установок контроля топологии

Оптическая система ЭМ-6029Б NA=0,5; $\beta=25X$; Ског=0,8; $\lambda=546\text{нм}$					
Минимальный элемент (нм)	ЧКХ без-абerraц. об-ва	ЧКХ реальной системы	Контраст системы	Контраст фото-приемника	Результир. контраст
500	0,40	0,35	0,80	0,40	0,30
450	0,30	0,30	0,70	0,40	0,30
400	0,20	0,16	0,60	0,40	0,25
350	0,10	0,10	0,30	0,30	0,10
300	0,04	0,04	0,10	0,30	0,03
200	0,02	0,01	0,00	0,30	0,00
Оптическая система ЭМ-6329 NA=0,75; $\beta=52X$; Ског=0,8; $\lambda=436\text{нм}$					
500	0,60	0,57	0,90	0,30	0,30
400	0,50	0,45	0,80	0,30	0,25
350	0,40	0,35	0,70	0,30	0,20
300	0,30	0,25	0,60	0,30	0,20
200	0,20	0,17	0,50	0,30	0,15
170	0,10	0,10	0,30	0,20	0,03
150	0,05	0,04	0,00	0,10	0,00

Испытания на обнаружительную способность проводятся по следующей схеме:

1. Подтверждение обнаружительной способности для минимального дефекта, обнаруживаемого со 100% вероятностью.

2. Подтверждение обнаружительной способности для минимального дефекта, размером "d", обнаруживаемого с вероятностью 95%. При этом d соответствует порогу обнаружения.

Последовательное определение вероятностей обнаружения дефектов с размерами, меньшими порога обнаружения. При этом последовательно рассматриваются дефекты, начиная с дефектов размером $d - \Delta d$, с шагом Δd , заканчивая дефектами, имеющими контраст 10%. Шаг Δd может быть выбран, например, равным 50 нм.

Предложенная методика определения вероятности обнаружения дефектов основан на использовании двух теорем, представляющих частные варианты закона больших чисел. Этот метод состоит в следующем.

Процесс последовательных сканирований участка тестового шаблона с аттестованными дефектами рассматривается как последовательность из n независимых испытаний (событий A) с двумя исходами каждое («успехом» и «неудачей»). При этом вероятности исходов не изменяются от испытания к испытанию. Такие испытания, как известно, называются испытаниями Бернулли. Соответственно, если пренебречь погрешностью перемещения координатного стола в точку начала сканирования, то независимыми можно считать и испытания, состоящие в сканировании каждого из группы дефектов одинаковой формы и размера. При этом количество циклов сканирования может быть уменьшено в "к" раз, где "к" – число однотипных дефектов на тестовом шаблоне.

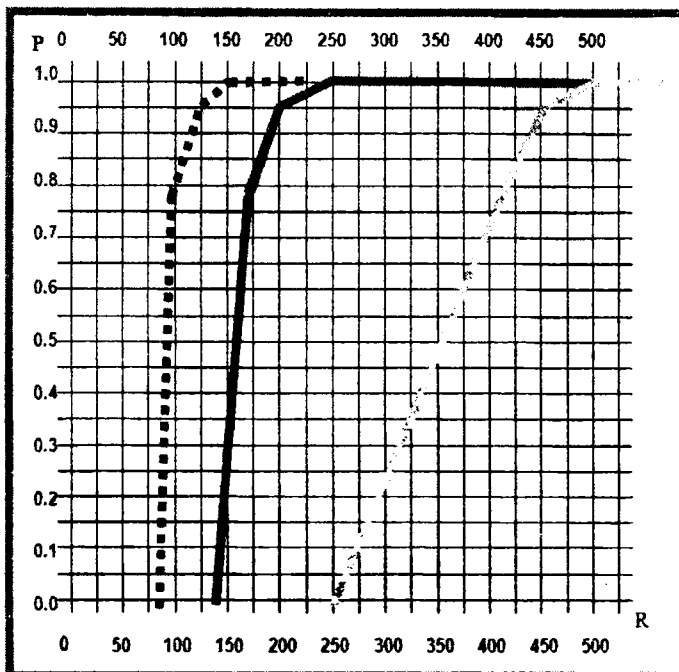


Рисунок 3 - Зависимость вероятности регистрации дефектов от порога обнаружения

Согласно следствию из теоремы Бернулли (при неограниченном увеличении числа опытов n частота события A сходится по вероятности к его вероятности P) [3, 4], вероятность обнаружения дефектов связана с частотой обнаружения дефектов следующим образом:

$$P(|m/n - p| < \epsilon) \geq 1 - p \cdot q / n \cdot \epsilon^2,$$

где P - вероятность нахождения вероятности обнаружения в интервале $\pm \epsilon$; m - число благоприятных исходов; n - общее число циклов сканирования; p - вероятность обнаружения дефектов; q - вероятность необнаружения дефектов; ϵ - размер доверительного интервала; m/n - частота события: «Обнаружение дефекта».

Для того, чтобы с вероятностью не меньшей, чем P (например, 0,95) можно было утверждать, что вероятность обнаружения минимального дефекта составляет p (например, 0,95), должно выполняться следующее неравенство:

$$1 - p \cdot q / n \cdot \epsilon^2 \geq 0,95, \text{ и, соответственно, } n \geq 20 \cdot p \cdot q / \epsilon^2 = 0,95 / \epsilon^2.$$

Отсюда получаем соответствие между значениями расхождения частоты и вероятности обнаружения ϵ и необходимым количеством циклов сканирования фотошаблонов, приведенное в табл.2. Например, для $\epsilon = 0,2$ должно быть выполнено 24 цикла сканирования (при наличии на тестовом шаблоне групп однотипных аттестованных дефектов количество

циклов сканирования может быть уменьшено в соответствующее число раз), а для $\epsilon = 0,005$ соответственно 38000.

При этом дефект должен быть обнаружен соответственно не менее 23-х и 38000 раз. Нужно отметить, что если воспользоваться теоремой Муавра-Лапласа, то можно получить существенно меньшие приближенные значения для числа циклов испытаний [4].

При необходимости подтверждения вероятностей P_1, P_2, \dots, P_n обнаружения дефектов различных размеров S_1, S_2, \dots, S_n , можно уменьшить количество испытаний, если использовать теорему Пуассона - распространение теоремы Бернулли на случай последовательности независимых испытаний, где вероятность появления события может зависеть от номера испытания.

Пусть эта вероятность для k -го испытания равна $P_k, k=1,2,3,\dots,n$, и пусть $P'=(P_1+P_2+\dots+P_n)/n$, тогда согласно следствию из теоремы Пуассона (Если производится n независимых опытов и вероятность появления события A в i -м опыте равна P_i , то при увеличении n частота события A сходится по вероятности к среднему арифметическому вероятностей P_i) [3, 4]:

$$P(|m/n - P'| < \epsilon) \geq 1 - P' \cdot Q' / n \cdot \epsilon^2.$$

Представленный метод. использован для подтверждения обнаружительной способности установок контроля топологии методом сравнения с проектными данными ЭМ-6029В и ЭМ-6329 для дефектов типа островков и прокол.

График, показывающий зависимость вероятности обнаружения дефектов типа островков и прокол от размеров дефектов для установок ЭМ-6029Б и ЭМ-6329 представлен на рис. 3.

Таблица 2 . **Необходимое количество независимых испытаний**

№ п/п	Величина рассогласования ϵ	Количество циклов n
1	0,005	38000
2	0,01	9500
3	0,05	380
4	0,1	95
5	0,2	24

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для уменьшения влияния ложных и некритичных дефектов необходимо определить вероятности обнаружения дефектов, имеющих размеры ниже порога обнаружения. Имея значения этих вероятностей, с одной стороны, и зная насколько вероятным является появление дефектов подобного рода, с другой стороны, можно выбрать оптимальные параметры системы фильтрации ложных дефектов. В частности, можно определять необходимость выполнения дополнительного цикла сканирования в режиме с высоким интерполяционным разрешением для уточнения размеров дефектов.

Точное определение вероятности обнаружения дефектов с размерами, меньшими порога обнаружения установки, позволяет оптимизировать процесс фильтрации ложных дефектов типа прокол и островков при автоматическом контроле топологии, а также повысить воспроизводимость контроля.

Предложенная методика позволяет точно определить количество испытаний, необходимых для подтверждения вероятности обнаружения дефектов при автоматическом контроле топологии и может использоваться при разработке программ и методик испытаний оборудования для автоматического контроля топологии СБИС и других изделий электронной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. W.W.Volk, W.H.Broadbent, H.I.Garsia, S.G.Watson, P.M.Lim, W.E.Rush, "Multi-beam high resolution die-to-database reticle inspection", EMC2002-Januar 15-16 Munich, Germany-pp.163-173. 2. C.C.Hung, C.S.Yoo, C.H.Lin, W.Volk, S.Kanna, S.Biellak, D.Wang, "Multi-Beam High Resolution UV Wavelength Reticle Inspection." Yield Management. Vol.3, Issue 2 Spring 2001. pp.68-75. 3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва, «Высшая школа», 2001.- 575с.

УДК 539.2+621.385.833.2

*Трушко А.В., Чижик С.А., Кузнецова Т.А., Шкадаревич А.П.,
Курганович А.М., Городкин Г.Р., Глеб Л.К.*

КОНТРОЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

*Белорусский Национальный Технический Университет,
Минск, Беларусь
Институт тепло и массообмена им. Лыкова НАН Беларуси,
Минск, Беларусь
НПРУП ЛЭМТ, БелОМО
Минск, Беларусь*

Высокие функциональные характеристики изделий современной оптики, в частности лазерной, во многом зависят от качества рабочих оптических поверхностей и их устойчивости в процессе эксплуатации. Важным характеристическим свойством оптических стекол является их шероховатость, значение которой необходимо контролировать при подборе режимов технологической обработки оптических поверхностей с целью улучшения их функциональных качеств.

Нанометровый диапазон шероховатости, достигаемый при обработке оптических поверхностей, требует использования высокоточных методов контроля. Традиционно шероховатость поверхностей оптических стекол определялась методом рентгеновской рефлектометрии [1]. Дополнительные возможности открываются с применением атомно-силовой микроскопии (АСМ) [2,3], которая позволяет непосредственно измерять шероховатость нанометрового диапазона, как по высоте, так и по латеральным размерам. Также АСМ позволяет контролировать единичные дефекты рельефа, которые важны при обеспечении работоспособности оптически деталей.

Одним из перспективных видов обработки оптических поверхностей является магнитореологическая полировальная технология. В работе приведены результаты сравнения полученных методом АСМ данных измерения шероховатостей поверхностей оптических призм после финишной обработки в АО ЛОМО и после магнитореологической полировки, произведенной в ИТМО НАН Беларуси.

Объект и метод исследования

Исходные оптические призмы изготавливались Санкт-петербургским оптико-механическим объединением (ЛОМО). Для уменьшения шероховатости поверхности исследуемые детали подвергались магнитореологической полировке суспензиями различного состава в ИТМО НАН Беларуси. Рассматривались следующие образцы:

- исходная поверхность после финишной обработки в АО ЛОМО;
- поверхности обработанные по магнитореологической полировальной технологии суспензиями 1, 2 и 3;
- поверхность после нанесения многослойных покрытий с чередованием слоев оксида кремния и оксида циркония;
- поверхность после последующей эксплуатации в лазерном резонаторе.

При финишной обработке использовались следующие составы суспензий:

- суспензия №1 на основе карбонильного железа EW (фирмы BASF) и абразива оксида церия (3 мкм.) CrO₂;
- суспензия №2 на основе карбонильного железа P10 (Россия) и оксида церия такой же фракции как и №1;