



УДК 621.382/.3

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.604.607

# ОБОРУДОВАНИЕ КОНТРОЛЯ МИКРОДЕФЕКТНОСТИ – НЕОБХОДИМАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

## MICRODEFECT INSPECTION TOOLS AS NECESSARY SYSTEM TECHNOLOGY CONSTITUENT

ПЛЕБАНОВИЧ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

*К. т. н., заместитель директора*

Vpleba@kbtem-omo.by

АВАКОВ СЕРГЕЙ МИРЗОЕВИЧ

*Д. т. н., директор*

ASM@kbtem-omo.by

ОАО «КБТЭМ-ОМО»

Республика Беларусь, 220033, г. Минск, Партизанский пр., 2

PLEBANOVICH VLADIMIR I.

*Ph.D, Deputy Director*

Vpleba@kbtem-omo.by

AVAKAW SYARHEI M.

*Sc.D, Director*

ASM@kbtem-omo.by

KBTEM-OMO JSC

2 Partizansky Ave., Minsk, 220033, Republic of Belarus

Насколько вы представляете себе тот вред, который приносит дефектность в процессе производства интегральных микросхем? Некоторые специалисты не придают этому должного внимания и теряют свои ресурсы. Сегодня доступно оборудование для автоматического контроля дефектности. При производстве интегральных микросхем необходимо встраивать автоматический контроль дефектности в технологический процесс.

**Ключевые слова:** дефект; технологический процесс; процент выхода; автоматический контроль; микросхема; микроскоп.

Can you imagine how much harm can be done by defects in the course of IC fabrication? Some experts do not pay enough attention and lose resources. However, there is an answer to this challenge called Automatic Defect Inspection Tools and this is exactly what contemporary IC production process needs for defect-free IC fabrication.

**Keywords:** defect; process; yield ratio; automatic inspection; integrated circuit; microscope.

Еще на начальном этапе развития микроэлектроники было установлено, что дефектность является основной причиной нефункционирования ИМС. В учебнике по технологии СБИС [1] приводятся различные модели зависимости процента выхода годных интегральных микросхем (ИМС) от дефектности. На рис. 1 приведена графическая зависимость процента выхода от накопленной дефектности для условного изделия.

Процент выхода годных ИМС является фактически экономическим параметром эффективности работы производственного и конструкторского подразделения. Например, если нулевая рентабельность продажи изделия достигается при проценте выхода 70 %, при фактическом проценте выхода выше 70 % продажи будут приносить прибыль, а ниже — убытки.



Рис. 1. Зависимость процента выхода для условной ИМС от накопленной дефектности

На рис. 2 представлен график зависимости частоты распределения дефектов от их диаметра для подложек диаметром 150 мм из одной партии пластин, только что поступивших с зарубежной фабрики по производству подложек и не подвергавшихся в кристалльной фабрике никаким обработкам. Из этого графика можно сделать одно очень важное наблюдение, что с уменьшением диаметра дефектов их количество растет экспоненциально.

Считается, что дефект размером более 30 % от проектной нормы приводит к летальному исходу ИМС. Учитывая вышесказанное, можно пересчитать (по формулам, изложенными в [1]) исходную дефектность подложек (представленную на рис. 2) в процент выхода годных ИМС в зависимости от проектной нормы для кристалла площадью 10 mm². Результаты расчетов сведены в табл. 1.

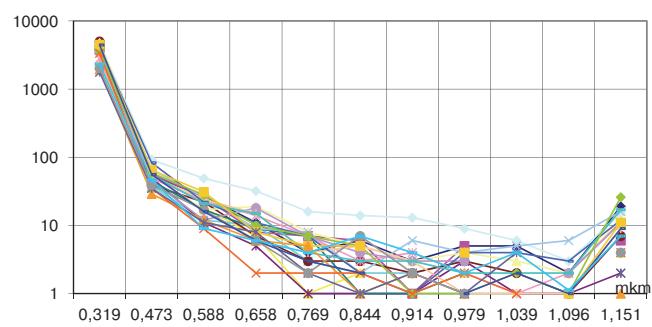


Рис. 2. График зависимости частоты распределения дефектов от их диаметра в логарифмическом масштабе



Таблица 1

Проектная норма, мкм	4,0	3,0	2,0	1,5	1,0
плотность дефектов, см <sup>-2</sup>	0,004	0,034	0,222	0,491	19,763
процент выхода годных ИМС	100,0 %	99,7 %	97,8 %	95,3 %	33,6 %

Таблица 2. Технические параметры установки ЭМ-6015М1

Наименование параметров	Значение
Диапазон увеличений микроскопа	20 х — 500 х
Максимальный размер поля контроля	200×200 мм
Минимальный рабочий отрезок объективов	11,5 мм
Диапазон размеров контролируемых элементов топологии	1,5—250 мкм
Точность измерения (3σ)	50 нм
Источники света	светодиоды
Условия эксплуатации	2 ИСО — 6 ИСО

При производстве ИМС с микронными проектными нормами и менее дефектность оказывает существенное влияние на процент выхода годных изделий и поэтому необходимо уделять пристальное внимание ее контролю.

Какие существуют способы контроля дефектности?

Самый простой способ — контроль под микроскопом. Но что оператор может увидеть в самый продвинутый микроскоп [1]? Минимальный разрешаемый оптикой элемент связан с длиной волны и апертурой объектива следующей формулой (2):

$$L_{\min} = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{Ap}, \quad (1)$$

где  $L_{\min}$  — минимальный разрешаемый элемент;  $\lambda$  — длина волны (для видимого света равна 555 нм);  $Ap$  — апертура объектива. Высококачественный объектив (не иммерсионный) трудно изготовить с апертурой более 0,95.

Минимальный разрешаемый элемент (рассчитанный по формуле (1)) в области видимого света составляет 356 нм. Теперь можно оценить максимальное увеличение микроскопа, которое будет приводить к улучшению реальной разрешающей способности глаза, для этого нормальное разрешение глаза (0,176 мм) [3] разделим на минимальный разрешающий элемент (356 нм) для данной длины света. В результате мы получим увеличение ~500 крат. Микроскопы с большим увеличением (например, 1000 крат) не приводят к улучшению разрешения глаза, а только увеличивают предмет без улучшения деталей изображения. Аналогом такого увеличения является цифровой зум, когда для увеличения размеров изображения просто увеличиваются размер пикселя.

Чтобы определить, для каких проектных норм подходит микроскоп с текущим разрешением, необходимо понимать, что для подробного рассмотрения топологического элемента необходимо рассмотреть на элементе 3–5 деталей с разрешением оптической системы. Следовательно, самый совершенный микроскоп в области видимого света позволяет контролировать топологические элементы размером 1,5 мкм. Таким образом, контроль под микроскопом возможен при изготовлении изделий с проектными нормами более 1,5 мкм. Возможен, но это не значит, что целесообразен, т. к. для контроля пластины 100 мм



Рис. 3. Внешний вид установки ЭМ-6015М1

по диаметру полосой шириной 5 мм при увеличении 500х оператор должен будет внимательно просмотреть более 5000 полей зрения. Если тратить на контроль каждого поля зрения не более 1 секунды, общее время контроля составит около 1 часа 30 минут. Сможет ли оператор полтора часа с полным вниманием проводить контроль? Ученые провели исследования и определили, что за это время оператор пропустит около 30 % дефектов и забракует около 10 % годных изделий. Для того чтобы оператору было удобно проводить контроль, нами разработана и серийно выпускается установка автоматизированного контроля дефектности ЭМ-6015М1. Установка оснащена классным микроскопом с автофокусом, автоматизированным столом, который по командам с компьютера обойдет все ключевые точки контроля. Задача оператора — внимательно контролировать тестовые структуры и фиксировать выявленные дефекты при помощи пульта управления, не отвлекаясь на наводку фокуса и поиск очередной точки контроля. Компьютер безошибочно запомнит все координаты мест, помеченные оператором, с указанием признака соответствующего дефекта. Дополнительно оператор может измерить линейные размеры топологических структур и сделать фотографию заинтересовавшего участка топологии. Для удобства контроля установка снабжена тремя независимыми источниками света, которые обеспечивают получение изображения в проходящем свете — для контроля фотошаблонов, в отраженном свете для контроля полупроводниковых пластин; дополнительно реализовано освещение «темное поле», которое может быть использовано совместно с любым видом освещения. Внешний вид установки представлен на рис. 3. Установка выполнена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к оборудованию, располагаемому в чистых комнатах. Основные параметры установки ЭМ-6015М1 приведены в табл. 2.

Для увеличения разрешения согласно формуле (2) нужно снижать длину волны, при которой проводится наблюдение изображения, а для снижения ошибок — переходить на полностью автоматические системы контроля.

Основой автоматического контроля микродефектов на пластинах с топологией является алгоритм попиксельного сравнения рядом расположенных кристаллов. Он является наиболее защищенным от влияния внешних факторов. На основе данного



Рис. 4. Установка автоматического контроля микродефектов ЭМ-6429Б

алгоритма нами разработана установка автоматического контроля микродефектов ЭМ-6429Б. Эта установка предназначена для проведения автоматического контроля дефектов на пластинах с топологией. Установка ЭМ-6429Б позволяет обнаружить: локальные дефекты, наличие посторонних частиц, нарушение целостности технологических слоев (царапины), искажение топологии (вырывы, выступы на краях элементов, разрывы

Таблица 3. Технические параметры установки ЭМ-6429Б

Наименование параметров	Значение
Размер контролируемого пикселя, мкм	0,25
Производительность контроля, мм <sup>2</sup> /с	10
Производительность контроля (по диаметру пластины), пл/час	
Ø100 мм	73
Ø150 мм	49
Диаметр контролируемых пластин, мм	100, 150
Условия эксплуатации	10–100 класс

элементов, перемычки и т. п.). Внешний вид установки представлен на рис. 4, основные параметры установки — в табл. 3.

Так как установка является полностью автоматической, то вмешательство оператора в процессе контроля не требуется, а результаты представляются в виде таблицы и карты дефектов (рис. 5). После контроля и формирования таблицы дефектов оператор на установке может предварительно провести сортировку и анализ обнаруженных дефектов (рис. 6).

Основное назначение установок контроля дефектности — получение объективной информации об уровне дефектности технологического процесса. Имея такую информацию, технологическая служба разрабатывает план действий по сокращению дефектов. После реализации плана улучшений установка позволяет оценить достигнутый результат и сравнить его с тем, что был до проведения

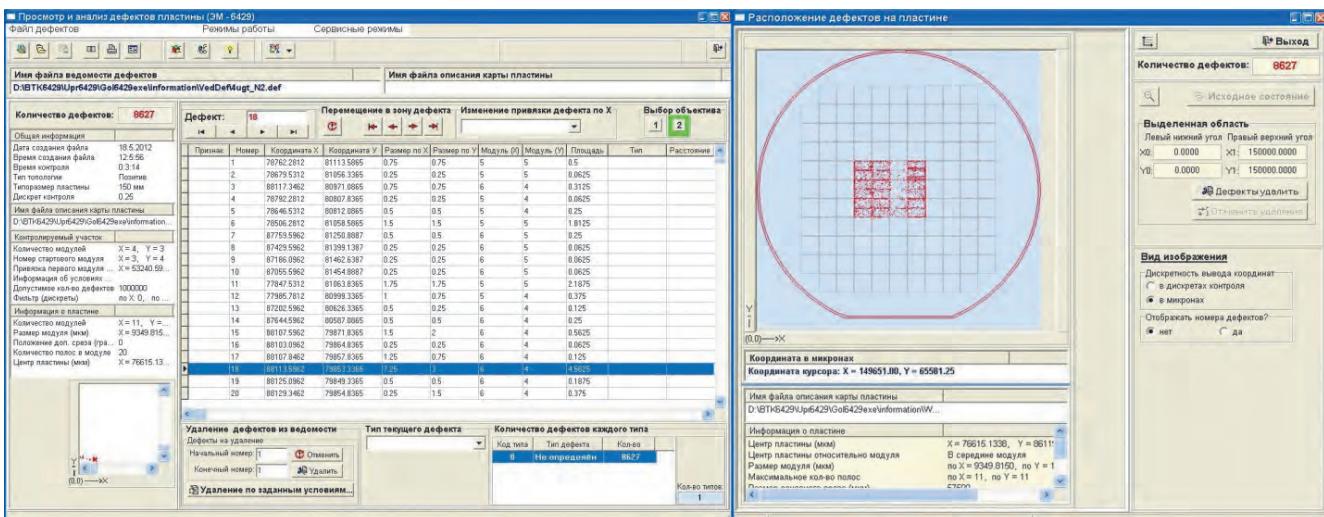


Рис. 5. Результаты контроля микродефектности на установке ЭМ-6429

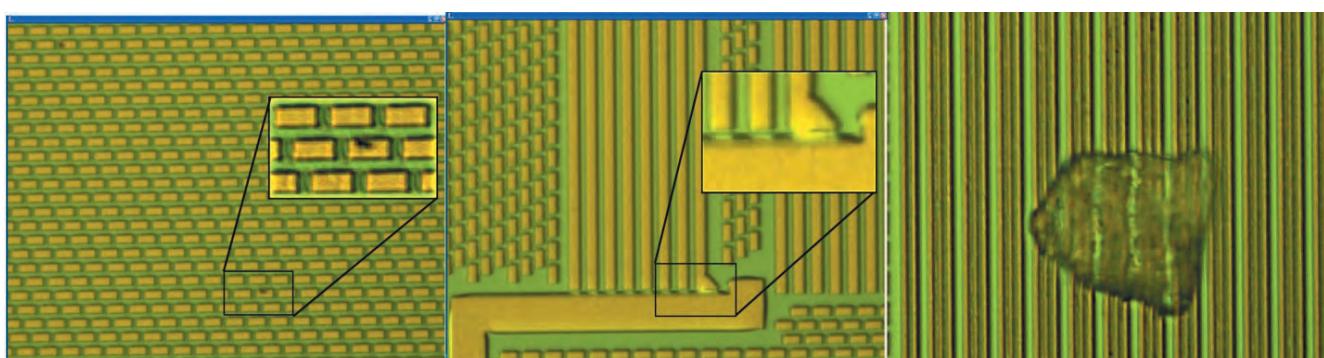


Рис. 6. Некоторые дефекты, обнаруженные в процессе контроля пластин



Таблица 4. Технические параметры установки ЭМ-6129

Параметр	Значение
Размер полупроводниковых пластин, мм	150, 200
Обнаруживаемый дефект, нм	35–45
Время сканирования пластины диаметром 200 мм:	
- высокая чувствительность, сек.	50
- низкая чувствительность, сек.	20
Условия эксплуатации	10–100 класс

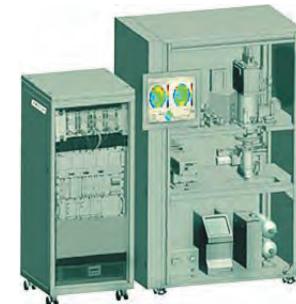


Рис. 7. Внешний вид установки ЭМ-6129

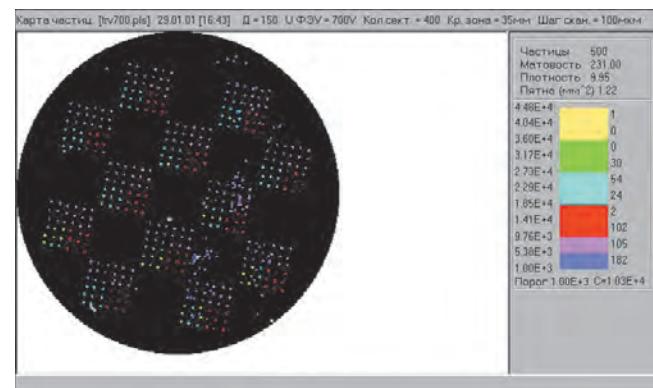
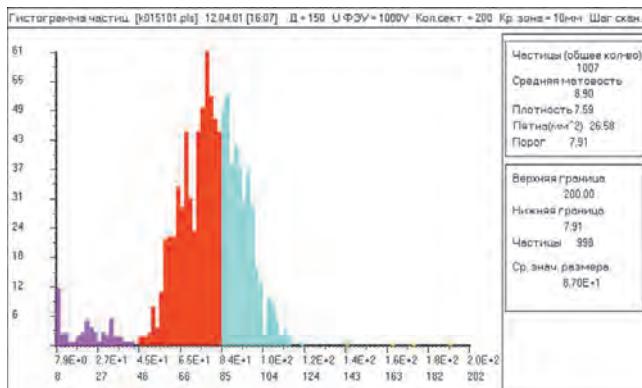


Рис. 8. Результаты контроля на установке ЭМ-6129

мероприятий. Установка ЭМ-6429, встроенная в технологический процесс, позволяет повысить процент выхода годных ИМС и улучшить экономические показатели производственной линии.

Чтобы составить план действенных мероприятий по снижению дефектности, необходимо четко представлять источник возникающих дефектов. Иногда это бывают режимы технологического процесса, иногда — чистота технологической оснастки или транспортной системы установки, подающих магистралей технологических сред, герметичность вакуумных магистралей и многое другое. Чтобы определить источник дефектов, пользуются таким приемом: проводят технологический процесс с чистой подложкой и определяют прирост дефектности на ней при разных условиях работы установки. Контролировать дефектность на подложках лучше при помощи установки контроля дефектности полупроводниковых пластин ЭМ-6129. Внешний вид установки представлен на рис. 7, технические характеристики установки представлены в табл. 4.

Принцип работы установки основан на попиксельном измерении фотометрических характеристик поверхности

полупроводниковой пластины. Установка выводит результаты контроля в виде таблиц, графических карт и гистограмм (рис. 8). Результаты контроля сохраняются в памяти установки, а также могут быть распечатаны.

Таким образом, представленный набор оборудования по контролю дефектности позволяет взять под наблюдение весь технологический процесс производства интегральных микросхем, обеспечить технических специалистов необходимой информацией для разработки реальных мероприятий по снижению дефектности технологических операций, повысить процент выхода и улучшить экономические показатели производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология СБИС: в двух кн. Кн. 2. Пер. с англ. / под ред. С. Зи. — М.: Мир, 1986. — 453 с., илл.
2. Плебанович В. И. Автоматический контроль микродефектности на полупроводниковых пластинах // Электроника НТБ, 2015. — № 5 (00145). — С. 132–140.
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Микроскоп>.