

Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта

Часть 3. Обнаружение дефектов полупроводниковых пластин в поляризованном свете

Дарья ДОРМИДОШИНА,
заместитель генерального директора,
АО «ЦКБ «Дейтон»
Юрий ЕВСТИФЕЕВ,
к.т.н., старший научный сотрудник,
профессор, АО «ЦКБ «Дейтон»,
medved55@mail.ru
Юрий РУБЦОВ,
генеральный директор,
АО «ЦКБ «Дейтон»

В Части 1 статьи (см. ЭК №2, 2025 г.) были описаны методы и способы настройки изображений для видимого диапазона обнаружения дефектов с помощью автоматизированного программно-аппаратного комплекса (АПАК). В Части 2 (см. ЭК №3, 2025 г.) рассмотрены методы измерения, классификации и формирования базы данных (БД) дефектов с помощью АПАК для поиска дефектов изделий электронной техники (ИЭТ) с сохранением изображения дефекта в БД для дальнейшего применения. В Части 3 описано обнаружение дефектов полупроводниковых пластин в поляризованном свете. В следующих частях статьи описываются функции автоматического опознавания дефектов, требования к устройствам компьютерного зрения, системам управления роботизированными устройствами АПАК, примеры внедрения в производство из практики исследований, разработки и эксплуатации на заводах-изготовителях ИЭТ и перспективы развития АПАК.

Введение

Технология производства полупроводниковых пластин (ПП) для изделий микроэлектроники превратилась в воспроизводимый и надежный производственный процесс. Однако этот процесс не идеален, и ПП все еще изготавливаются с дефектами. Некоторые из этих дефектов не позволяют использовать всю площадь ПП, поскольку любое изделие электронной техники (ИЭТ), изготовленное с таким дефектом, приводит к отказу или иным образом становится неработоспособным.

ПП обеспечивает основу, для которой качество и чистота имеют решающее значение для надлежащей работы ИЭТ. По мере того как ИЭТ уменьшаются до нанометрового масштаба, они становятся все более чувствительными к минимальным поверхностным или объемным дефектам ПП.

Полезно знать координаты и размеры дефекта на ПП. Кроме того, при изготовлении ИЭТ параметры отбора кристаллов с ПП для них можно изменить, обойдя те, которые содержат дефекты ПП.

К числу дефектов поверхности ПП относятся:

- царапины и сколы на поверхностном слое пластины, вызванные контактом с производственным оборудованием или инородными частицами. Эти царапины и сколы нарушают литографические процессы;

- ямки – крошечные углубления на поверхности пластины, где могут скапливаться загрязнения, которые затем переносятся на устройства;
- частицы – загрязняющие вещества, оставшиеся в результате контактов с оборудованием, людьми или химическими реагентами. Эти частицы препятствуют литографии и осаждению слоев. Объемные дефекты ПП:
- пустые пространства или зазоры внутри ПП создают проблемные места;
- скользящие дислокации – несоосность между кристаллическими структурами препятствует потоку носителей;
- примеси – инородные элементы или молекулы, включенные в кремний, отрицательно влияют на проводимость;
- дефекты окисации – нарушенные оксидные слои изменяют электрические свойства на границах раздела. Возникающие в ПП дефекты могут привести к следующим проблемам:
- нарушение литографии. Сверхмалые элементы на слоях вытравливаются с помощью литографических процессов. Любые поверхностные дефекты, частицы или царапины на пластине мешают световым узорам, необходимым для точного проецирования схемных конструкций на поверхность пластины. Это может привести к неточным размерам элементов или их деформации;

- перенос загрязнений. Любые загрязняющие вещества, присутствующие на поверхности ПП или внутри подповерхностных пустот, могут проникать через осажденные слои. Металлические примеси или органические остатки могут мигрировать в диэлектрики ИЭТ, ухудшая их параметры;
- снижение подвижности носителей заряда. Организованная структура кристаллической решетки кремния обеспечивает эффективный поток электронов. Точечные дефекты и дислокации препятствуют подвижности носителей заряда, что снижает рабочие частоты и скорости переключения;
- слабая структурная целостность. Трещины, сколы, ямки, пустоты и пузыри в ПП создают слабые места с механической и электрической точки зрения. Это делает ИЭТ склонными к отказу при термостратификации или приложенном напряжении во время работы. Внутренние напряжения могут со временем увеличить эти слабые места;
- электрические короткие замыкания и утечки. Пустоты или загрязняющие вещества, проникающие в области изоляции между элементами, ухудшают изоляционные свойства. Это приводит к утечке тока между цепями, снижая эффективность и увеличивая шум. В тяжелых случаях могут возникать короткие замыкания, которые останавливают функциональность ИЭТ;
- неоднородность по всей пластине. Изменения в толщине, чистоте, качестве и дефектах поверхности по всей ПП приводят к несоответствиям в производительности между будущими ИЭТ. Характеристики интегральных схем, изготовленных на идеальных участках ПП, превзойдут характеристики схем на ПП с локальными дефектами.

Считается, что трубчатые пустоты в ПП, обычно ориентированные перпендикулярно полированной поверхности, создают основные проблемы с качеством, поскольку особенно они снижают выход годных изделий [1], отрицательно влияя на электрические характеристики ИЭТ, могут вызывать снижение производительности и надежности устройств. Кроме того, эти пустоты инициируют биполярную деградацию в устройствах, где прямое падение напряжения увеличивается во время прямой проводимости.

Возможность обнаружения наличия и физического расположения дефектов ПП позволяет производителям ИЭТ определять физические области ПП, где можно получить рабочие кристаллы без таких дефектов, которые ухудшают или нарушают функциональность ИЭТ.

Ранее методы определения и расположения дефектов ПП включали в себя травление и применение просвечивающего электронного микроскопа. Однако оба метода являются деструктивными, их применение приводит к непригодной для использования ПП и не вполне подходит для тестирования на производственной линии. Другие же методы требуют дорогостоящего оборудования или специальных помещений. Например, для рентгеновской томографии необходим источник синхротронного света, который имеется только в нескольких исследовательских центрах в мире. Другие методы, к которым относятся атомно-силовая, сканирующая электронная и оптическая микроскопии, обнаруживают не все дефекты. Выгоднее очертить и локализовать дефекты ПП. Известно, что объемные дефекты проникают в структуру во время эпитаксиального роста и вызывают отказ устройства. Кроме того, дефекты могут быть вызваны такими процессами как резка, полировка и подготовка ПП к дальнейшему использованию [2].

Прежде не существовал эффективный метод или система для характеристики дефектов. Кроме того, ранее не было эффективного метода или системы для определения дефектов и их распространения либо их корреляции с ямками роста эпитаксиального слоя.

В основном, прежде идентификация дефектов ПП основывалась на ручном визуальном осмотре – методе с высокой стоимостью, затратами времени и низкой эффективностью для массового производства. В настоящее время обнаружение пластин основано на зондовом обнаружении. Такой метод позволяет определять только электрические характеристики кристалла на ПП и может вызвать механические повреждения.

Таким образом, разработка неразрушающей, недорогой и быстрой системы обнаружения и метода определения дефектов на ПП является задачей, на которую было обращено наше внимание.

ПП состоят из нескольких слоев. Для каждого слоя выполняется сложный и точный процесс осаждения материала, нанесения резиста, литографии, травления и ионной имплантации, после чего резист удаляется. Перед нанесением следующего слоя необходимо проверить новый на наличие дефектов. Слои ПП могут иметь широкий ряд дефектов, которые влияют на конечную производительность ИЭТ. Если их не обнаружить сразу после осаждения слоя, такие дефекты могут быть выявлены только при окончательном тестировании, что приводит к потере ценных ресурсов за счет увеличения стоимости изделия. Хуже того, дефекты на самых низких уровнях могут вообще не обнаруживаться. Даже если они проходят окончательное электрическое тестирование, необнаруженные дефекты могут снизить надежность эксплуатации, вызвав преждевременный отказ.

Область возможных дефектов велика и они могут располагаться в любом месте ПП. Дефекты в покрытиях могут проявляться в виде непредсказуемых изменений цвета и должны быть обнаружены на сложном фоне ранее нанесенных слоев. Человеческое зрение неспособно обнаружить такой широкий ряд ошибок и ненадежно при обнаружении дефектов на многослойном фоне.

Мы разработали систему для автоматического обнаружения дефектов с учетом их характеристик и предложили алгоритм для обнаружения их положения на изображении с использованием дисперсионного фильтра. Мы продемонстрируем не только результат автоматического обнаружения дефектов, но и процесс реализации алгоритма их выявления.

Основная часть

Существующие методы обнаружения дефектов поверхности ПП можно разделить на две основные категории: методы, основанные на обработке изображений, и методы на основе глубокого машинного обучения. Ранние методы обнаружения дефектов ПП основаны на технологии обработки изображений, на вычислении разницы между изображением, подлежащим тестированию, и эталонным изображением и в значительной степени зависят от точности эталонного изображения.

Существуют методы проверки ПП, основанные на сопоставлении шаблонов. Применяются также многослойная пороговая сегментация и локальная бинарная сегментация для отделения от фона дефектов, к которым относятся загрязнения, сколы и трещины. Хотя эти методы обработки изображений позволяют обнаружить дефекты ПП, большинство из них предназначено для конкретных случаев. Такие методы плохо обобщены и не могут быть достаточно расширены для обнаружения дефектов других ПП. Поскольку не все пластины одинаковы, каждая имеет свои особенности.

В последние годы расширяется применение глубокого машинного обучения для обнаружения дефектов ПП благодаря возможности извлечения признаков. Усовершенствованные алгоритмы кластеризации были объединены с морфологическими методами для повышения устойчивости процесса извлечения сегментации дефектов к шуму. Предлагались трехэтапные методы обнаружения дефектов ПП, в том числе этапы расчетов локальных областей, обнаружения дефектов и уточнения. Выполнялись исследования в части квантовой классической гибридной модели для обнаружения дефектов ПП. Хотя методы глубокого обучения и повысили точность обнаружения дефектов, их применение по-прежнему требует больших вычислительных ресурсов и продолжительного времени. Кроме того, для обучения необходим значительный объем маркированных данных, а обнаружение ПП других типов требует повторного обучения с новыми маркированными образцами. Для многих типов задач обнаружения дефектов ПП мы используем методы кластеризации. Наш метод сегментирует локальные области ПП и отмечает дефектные места на карте пластины. Анализ карт дефектных пластин помогает изготовителям вовремя определить причину дефектов.

Целями данного исследования и создания автоматизированного программно-аппаратного комплекса для поиска дефектов изделий микроэлектроники с использованием технологий искусственного интеллекта является разработка недорогой, быстрой, неразрушающей системы и метода определения дефектов в ПП с эпитаксиальным слоем или без него, метода исследования взаимосвязи между дефектами ПП и качеством ИЭТ, метода исследования распространения дефектов определенного типа.

Перечисленные цели достигаются путем использования поляризованного света для выполнения быстрого, недорогого и неразрушающего метода обнаружения дефектов [3].

Результаты теоретических исследований поляризации и анализа изображений для обнаружения дефектов

При генерации поляризованного света используются поляризаторы двух типов:

- линейный поляризатор, основанный на использовании одного из трех физических явлений. Первое – двойное лучепреломление, второе – линейный дихроизм (явление, состоящее в различном поглощении веществом света в зависимости от его поляризации), третье – поляризация света при отражении на границах раздела сред. Линейный поляризатор может использоваться для линейной поляризации источника света, прошедшего через пластину и полученного камерой-микроскопом [4];
- круговой поляризатор представляют собой совокупность линейного поляризатора и четвертьволновой пластинки (оптического компенсатора).

Дефекты обнаруживаются, когда напряженные области (дефекты) ПП, оптически изотропного материала, становятся анизотропными, тем самым допуская двойное преломление, которое можно обнаружить и зафиксировать с помощью камеры-микроскопа. Дефекты вызывают напряжение вокруг мест их нахождения, которое таким образом обнаруживается [5].

В разных случаях либо линейная, либо круговая поляризация обеспечивает лучшую инспекцию. Однако результат можно улучшить, если учитывать интенсивность рассеяния и ортогональность поляризации между дефектами ПП и основными материалами ПП. Качественно ортогональность поляризации является мерой того, насколько рассеяния дефектов и поверхности ПП могут быть разделены оптически на основе разницы в их состояниях поляризации. Например, если рассеяния как дефектов, так и ПП линейно поляризованы и, кроме того, если одно из них имеет Р-поляризацию (одна из возможных поляризаций света, падающего на плоскую поверхность раздела двух сред, характеризуется тем, что вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости падения), а другое – S-поляризацию (напряженность электрического поля электромагнитной волны перпендикулярна плоскости падения и параллельна плоскости границы раздела сред), их ортогональность поляризации можно определить как 1 [6].

В этом случае рассеяние ПП может быть полностью подавлено линейным поляризатором, в то время как сигнал другой частицы останется неизменным. Напротив, если оба рассеяния линейно поляризованы, но параллельны друг другу, их ортогональность поляризации можно определить как 0. В этом случае нет возможности дифференцировать их с помощью поляризатора. Кроме того, если рассеяние частиц линейно поляризовано, а рассеяние ПП имеет круговую поляризацию, их ортогональность поляризации можно определить как 0,5, поскольку линейный анализ может быть выровнен с направлением поляризации рассеяния частиц и одновременным уменьшением рассеяния пластины в два раза.

Чтобы количественно описать ортогональность поляризации поля E чисто поляризованного света, необходимо определить вектор Джонса [7], компоненты которого несут информацию об амплитудах и фазах, составляющих вектора напряженности электрического поля:

Таблица. Примеры нормализованных векторов Джонса

Описание	Значение
Линейная поляризация в направлении x (горизонтальная)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Линейная поляризация в направлении y (вертикальная)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
Линейная поляризация под углом 45° к направлению x (диагональная)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
Линейная поляризация под углом -45° к направлению x (антидиагональная)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$
Правосторонняя круговая поляризация на угол Δφ	$\begin{bmatrix} 1 \\ i \Delta\phi \end{bmatrix}$
Левосторонняя круговая поляризация на угол Δφ	$\begin{bmatrix} 1 \\ -i \Delta\phi \end{bmatrix}$

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x e^{i\varphi_x} \\ a_y e^{i\varphi_y} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где a_x и a_y – амплитуды компонентов электрического поля, φ_x и φ_y – фазы этих компонентов. Для полного определения состояния поляризации требуется разность фаз

$$\delta = \varphi_y - \varphi_x. \quad (2)$$

В таблице приводятся шесть примеров нормализованных векторов Джонса.

Ортогональность поляризации двух поляризованных полей E, одно из которых предназначено для рассеяния на дефектах, а другое – для рассеяния на пластинах, можно интерпретировать как 1 минус нормализованная величина одного вектора поля E, спроецированная на другой вектор поля E.

Значения ортогональности поляризации двух поляризованных полей E находятся в диапазоне 0–1, где 0 означает, что два состояния поляризации идентичны, а 1 означает полную ортогональность.

Для шероховатых поверхностей ПП, рассеянный свет может быть частично поляризован, который можно определить вектором Стокса [8]. Для сравнения, вектор Джонса применим только для полностью поляризованного излучения и связан с когерентным излучением. Вектор Стокса определен как

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где S_0, S_1, S_2, S_3 – четыре элемента вектора Стокса, которые можно извлечь из измерений поляриметрии. Интенсивность поляризованной части определяется по формуле

$$S_{\text{pol}} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}. \quad (4)$$

Интенсивность неполяризованного света определяется по формуле

$$S_{\text{unpol}} = S_0 - S_{\text{pol}} \quad (5)$$

Степень поляризации определяется по формуле

$$P_{\text{pol}} = \frac{S_{\text{pol}}}{S_0}. \quad (6)$$

Компоненты x и y поляризованного света определяются по формулам

$$\begin{aligned} |E_x|^2 &= \frac{1}{2}(S_{\text{pol}} + S_1) \\ |E_y|^2 &= \frac{1}{2}(S_{\text{pol}} - S_1) \end{aligned}, \quad (7)$$

Разность фаз между компонентами x/y поляризованной части поля E выражается следующим образом

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{S_3}{S_2}. \quad (8)$$

По определению, разность фаз между компонентами x/y неполяризованной части поля E случайным образом распределена в диапазоне $0-360^\circ$.

Размеры инспектируемых на ПП частиц обычно достаточно малы, так что рассеянный свет от них всегда поляризован. Следовательно, частично поляризовано только рассеяние поверхности ПП. Поляризованную часть рассеяния ПП можно рассматривать как обсуждалось ранее, а неполяризованная часть рассеяния ПП обычно наполовину ослаблена. Неподавленная часть неполяризованного света рассеяния ПП представляет собой остаточный фон, который можно учитывать в процессе оптимизации.

Теоретические исследования поляризации и анализа изображений для обнаружения дефектов ПП применяются при построении АПАК.

Основное назначение составных частей АПАК и их функционирование

Разработанный АПАК может определять местоположение и, следовательно, картировать дефекты ПП. АПАК представляет собой систему для обнаружения дефектов в ПП, в состав которой входят:

- компьютер с монитором;
- ПО с инструкциями по управлению средствами перемещения (камерой-микроскопом и передвижным столом с отражающей поверхностью);
- база данных;
- набор информации с описанием дефектов;
- камера-микроскоп;
- источник поляризационного света;
- передвижной стол с отражающей поверхностью.

Компьютерное зрение (КЗ) получает информацию – изображение с дефектами, освещенными поляризованным светом, и набор программных инструкций, включенных в ПО для выделения множества связанных с ПП областей сканирования, получения информации сканирования, по меньшей мере, одной области с помощью КЗ и для отображения результатов сканирования на мониторе. Таким образом, освещенные поляризованным светом дефекты ПП можно быстро определить неразрушающим способом.

АПАК содержит программные инструкции для хранения информации о сканировании в компьютере, ее накопления для создания цифровой карты, представляющей всю область ПП. В АПАК имеется привод для приведения в действие камеры-микроскопа КЗ и набор программных инструкций для получения информации о размещении области ПП, запуска камеры-микроскопа КЗ в соответствии с информацией о размещении области ПП. В состав АПАК входит источник отражающего света, расположенный рядом с ПП, для отражения света от ПП, который должен быть принят КЗ. Программное обеспечение содержит инструкции для получения информации об отражающем свете от ПП и отображения информации об отражающем свете на мониторе для просмотра искажений в отражающем свете, представляющих дефекты в ПП. В набор характеристик дефектов, содержащихся в считываемом компьютером носителе, и в набор считываемых компьютером инструкций входят инструкции для просмотра информации сканирования, определения наличия дефектов путем их идентификации в соответствии с характеристиками в информации сканирования. АПАК может содержать считываемые компьютером инструкции для определения областей контрастной дифференциации, представляющих края ПП в соответствии с информацией сканирования, и создания граничной информации в соответствии с областями контрастной дифференциации и расчета площади ПП в соответствии с граничной информацией.

АПАК содержит способ определения дефектов в ПП, включающий ее размещение ниже источника поляризованного света и камеры-микроскопа, а также сегментацию изображения ПП на множество областей сканирования и просмотра, благодаря чему обеспечивается неразрушающий метод определения дефектов в полупроводниковой пластине с использованием поляризованного света. Последующий анализ можно осуществлять с помощью карты с сохраненной информацией сканирования множества областей. Карту со сканированной информацией можно использовать для отображения набора характеристик дефектов и обзора полученной информации для определения наличия дефектов путем их идентификации в соответствии с набором характеристик дефектов, полученных в отсканированной информации.

Последующее подробное описание этапов можно представить в терминах ПО АПАК. Эти процедурные описания являются представлениями, используемыми специалистами в данной области для наиболее эффективной передачи сути результатов работы другим специалистам. Описанные процедуры, как правило, представляют собой самосогласованную последовательность шагов, приводящую к желаемому результату. Эти шаги требуют манипуляций такими физическими величинами как электрические или магнитные сигналы, которые могут быть сохранены, переданы, объединены, сравнены или иным образом обработаны для выполнения определенной задачи или задач.

Схема функционирования АПАК для обнаружения дефектов ПП в поляризованном свете представлена на рис. 1.

Компьютер подключен к цифровому устройству формирования изображений камере – микроскопу. Для получения цифровых изображений передвижной стол оперативно связан с компьютером и обеспечивает перемещение полупроводниковой пластины перед камерой-микроскопом, позволяя ей сканировать всю поверхность полупроводниковой пластины. Отражающая поверхность передвижного стола находится под ПП и позволяет камере-микроскопу захватывать изображение не только с поверхности пластины, но и ее внутреннюю часть. Компьютер получает информацию о физическом местоположении полупроводниковой пластины, сканирует ее в соответствии с ее местоположением. Далее полупроводниковая пластина сегментируется на области сканирования, так что камера-микроскоп захватывает информацию для каждой области сканирования и отправляет эту информацию на компьютер для хранения и накопления. Накапливая цифровую информацию для каждой области сканирования, можно отобразить дефекты на всей пластине.

Процесс обнаружения дефектов ПП начинается с шага, когда она помещается на передвижной стол. Изображение, полученное в результате сканирования, отображается на мониторе. Границы ПП указываются, так что считываемые компьютером инструкции могут связать эти границы с физическим местоположением и они известны для сканирования. Это позволяет ПО «изучить» границы ПП, чтобы сканировать всю пластину, манипулируя ею. ПО использует инструкции для определения размера ПП из информации сканирова-

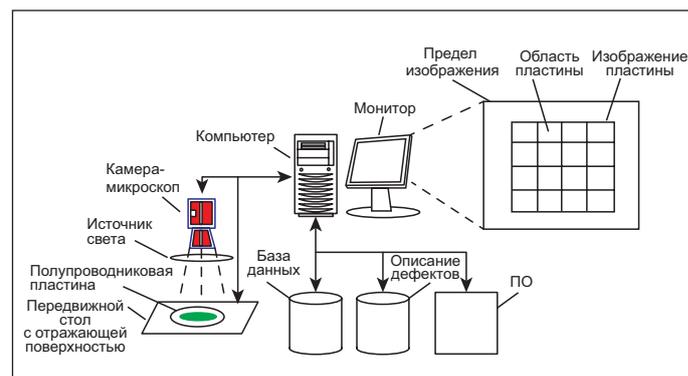


Рис. 1. Схема функционирования АПАК для обнаружения дефектов ПП в поляризованном свете

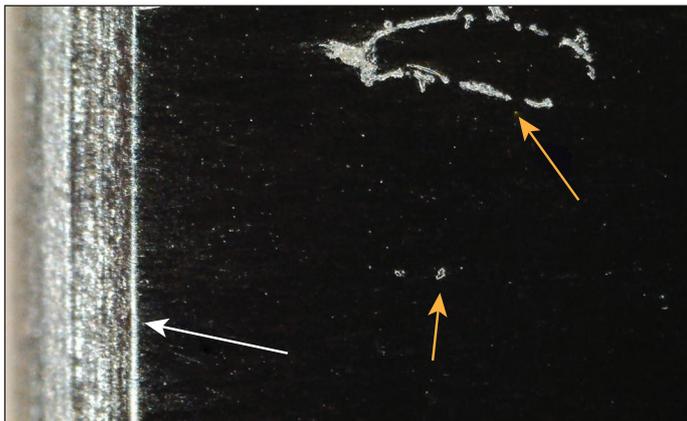


Рис. 2. Фрагмент изображения ПП со значительными дефектами на краю ПП

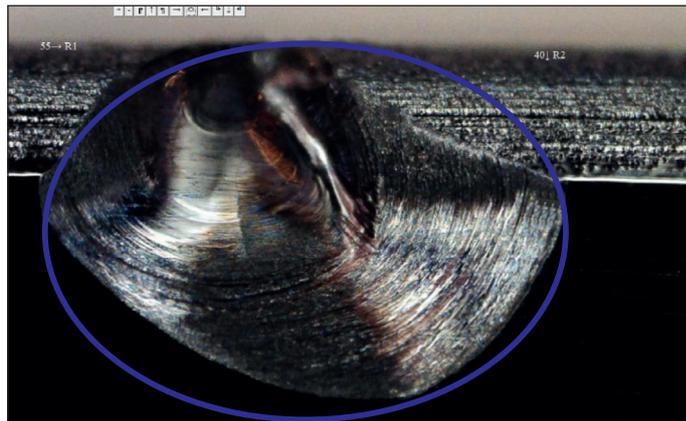


Рис. 3. Фрагмент изображения ПП с дефектом на краю ПП в виде скола, видимый в поляризованном свете

ния, а не полагаясь на измерения производителя ПП или ручной ввод. Границы ПП также можно определить, обнаружив контрастную дифференциацию в свете, полученном камерой-микроскопом. Участки с достаточной дифференциацией контраста соответствуют границе ПП. Определение информации о границе позволяет рассчитать площадь ПП.

Сканирование начинается с текущей области и сохранения результатов сканирования на компьютерном носителе с информацией о местоположении. Процесс сканирования можно приостанавливать, сохраняя результаты каждого сканирования, и возобновлять без перезапуска. При наличии оставшихся для сканирования областей процесс возвращается для сканирования следующей области. Если установлено, что все области отсканированы, информация о сканировании может быть извлечена с компьютерного носителя, накоплена для формирования карты, представляющей изображение ПП, и отображена для обнаружения дефектов. С помощью этих шагов дефекты ПП могут быть увеличены в размерах, что облегчает определение местоположения и картирование. Кроме того, используя технику цветной визуализации для соответствующего поведения оптического напряжения, полученного из дефектов ПП, неоднородность пластины может быть проиллюстрирована недорогим быстрым неразрушающим способом. Традиционные методы обнаружения дефектов позволяют определять такое местоположение и отображать дефекты.

Кроме того, используемые компьютером инструкции автоматически обнаруживают дефекты ПП. При автоматическом обнаружении дефектов применение этих инструкций позволяет сканировать накопленную цифровую информацию об изображении и сравнивать ее с информацией о дефектах для получения карты дефектов на ПП. Информация о дефекте может представлять форму, размер и яркость освещенного дефекта. На основе predetermined значений размера и яркости считываемые компьютером инструкции могут сравнивать информацию сканирования с формой дефекта predetermined размера и predetermined яркости, чтобы установить присутствие дефекта.

АПАК позволяет проводить быструю и подробную оценку дефектов ПП. Для целей инспекции важно не только выявлять дефекты, но и собирать информацию об их распределении и плотности для контроля качества. Дефекты, которые показывают четкий контраст, можно обнаружить относительно легко путем обработки изображений. Однако контраст между пронизывающими дислокациями слабее и сложнее, что затрудняет их автоматическое обнаружение. Кроме того, поскольку в зависимости от качества полировки обратной стороны ПП контраст может ослабевать из-за рассеяния света, используется решение по применению к изображению фильтра дисперсии, который выделяет области с резкими изменениями интенсивности. Это решение эффективно улавливает локальные изменения контраста вокруг пронизывающих дислокаций. Затем отфильтрованное изобра-

жение бинаризуется, и области с высоким контрастом группируются для идентификации дислокаций. Используя этот подход, контрасты дислокаций автоматически обнаруживаются и выделяются, даже если контраст относительно слабый или сложный.

Исследования процессов обнаружения дефектов полупроводниковых пластин

Чтобы обнаружить дефект ПП, используется эффект фотоупругости, поскольку дефект вызывает изменение в распределении напряжений вокруг местоположения. Информация сканирования с камеры-микроскопа передается на компьютер. Эта камера сканирует определенную область или всю ПП, собирает и хранит области сканирования в базе данных. ПО содержит инструкции для управления передвижениями и для обнаружения дефектов из информации, полученной от камеры-микроскопа. В процессе работы ПП сканируется по областям или иным образом (см. рис. 1), а затем отображается на мониторе. В пределах изображения показана ПП с разными областями. Программное обеспечение позволяет увеличивать изображение ПП и любые дефекты для удобства просмотра.

В ПП низкого качества плотность дефектов может быть слишком большой, чтобы обеспечить очертание каждого дефекта, поскольку результаты освещения поляризованным светом могут перекрываться, интенсивность поляризованного света может быть уменьшена, чтобы уменьшить или предотвратить такое перекрытие. Затем свет отражается от ПП и используется для очерчивания дефектов в сочетании с поляризованным светом. Отраженный свет вызывает появление затемненной области с дефектом, чтобы помочь в дальнейшем его очерчивании. Отражающая поверхность является источником отраженного света на ПП и принимается камерой-микроскопом. Искажения отраженного света, вызванные дефектами в ПП, особенно эпитаксиальным слоем, регистрируются камерой-микроскопом. Таким образом, дефекты могут быть идентифицированы по искажениям отраженного света.

Поскольку набор характеристик (описание) дефектов содержится в носителе, информация сканирования может сравниваться с набором характеристик дефектов пластины для их идентификации. Набор характеристик дефектов может включать информацию, представляющую форму дефекта, размер формы, яркость. Кроме того, могут быть получены поверхностные узоры, прогнозирующие дефекты внутри ПП.

На рис. 2 показан фрагмент изображения ПП с дефектами на ее краю. Белой стрелкой показан край пластины, желтой – дефекты. В верхней левой части изображения сосредоточены поверхностные узоры, прогнозирующие дефекты внутри ПП.

Часть дефектов малозаметна, но наблюдение в поляризованном свете позволяет обнаружить их наличие и местоположение. Кроме

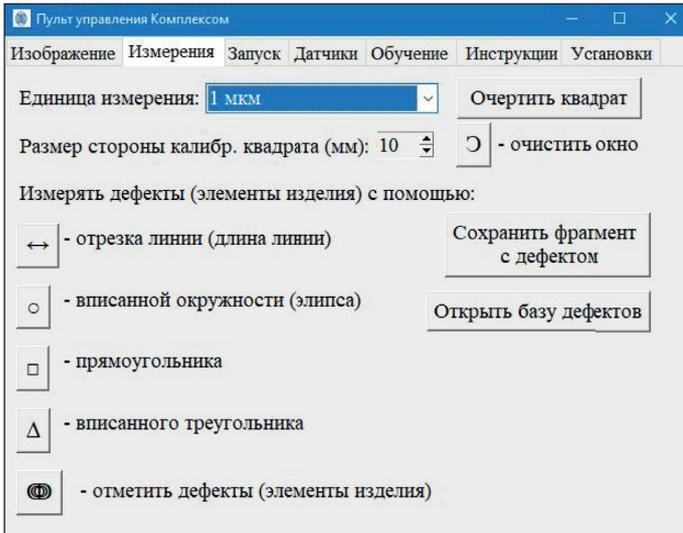


Рис. 4. Настройки и установки раздела «Измерения» АПАК

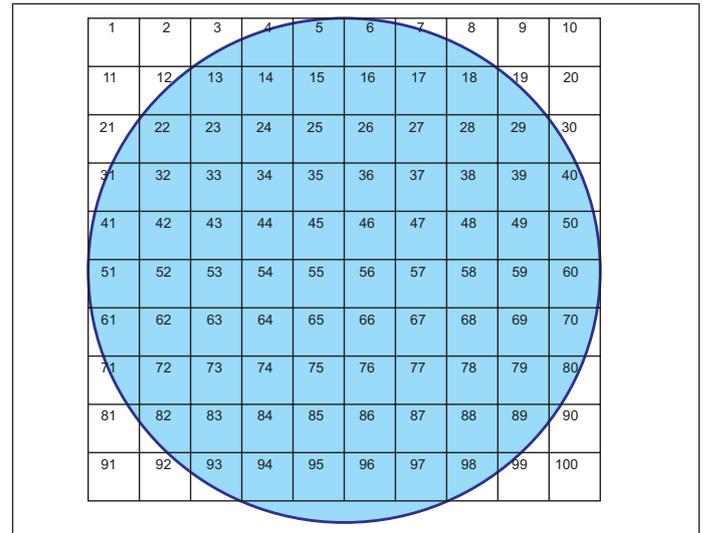


Рис. 5. Пример карты дефектов ПП

того, пустоты, которые создают большие поля напряжений, отображаются намного контрастнее и однозначно идентифицируются.

На рис. 3 показан фрагмент изображения ПП с дефектом скола на краю ПП в поляризованном свете. Скол ПП очерчен эллипсом с радиусами 55 и 40 мкм с помощью инструментов раздела «Измерения», настройки и установки которого описаны Части 2 статьи и показаны на рис. 4.

Учитывая характерную особенность дефектов, в АПАК используется фильтр дисперсии для обнаружения большого локального изменения уровня контраста. Фильтры дисперсии, которые вычисляют градиент или аналогичное значение уровня контраста, например фильтр Лапласа и фильтр Собеля, являются хорошим выбором для автоматического обнаружения. Отметим особенности применения алгоритма обнаружения дефектов с использованием фильтра дисперсии:

- во-первых, 8-бит изображение линейно преобразовано таким образом, что усредненные значения пикселей нормализованного изображения стали равны 128 (центр динамического диапазона), а дисперсия значений пикселей стала определенным значением. Процесс нормализации позволяет обнаруживать дефекты даже изображений с разными уровнями контраста;
- во-вторых, к нормализованному изображению был применен фильтр дисперсии. Алгоритм дисперсионного фильтра состоит из замены значений центрального пикселя дисперсией квадратного набора из n_1 на n_2 значений окружающих его пикселей. Поскольку значения дисперсии велики в тех местах, где уровень контраста меняется, они принимают большие значения вблизи контрастов дислокации. Затем была выполнена бинаризация изображения с использованием порогового значения, и получено черно-белое изображение. На нем белый пиксель означает, что соответствующее значение дисперсии больше порогового значения. Затем белые пиксели были отмечены так, чтобы каждая группа соединяющихся белых пикселей имела одинаковую метку. Был рассчитан минимальный прямоугольник для каждой группы, исключен меньший размер прямоугольников, меньше пороговое значение. Все контрасты дислокации были обнаружены текущим алгоритмом с относительно высокой точностью.

Однако при этом могут обнаружиться ошибки двух типов:

- ошибка множественного обнаружения, когда множественные плотные дислокационные контрасты учитываются как один дислокационный контраст;
- дефекты с очень слабыми контрастами не обнаруживаются.

Этих ошибок можно избежать, изменив параметры обнаружения, что может вызвать другие ошибки. Таким образом, исследование

и выявление ошибок этих двух типов показывает необходимость в их учете при проведении инспекции.

Учет дефектов ПП проводится с помощью таблиц их классификации и карты дефектов ПП. Пример карты дефектов ПП представлен на рис. 5. В ячейку таблицы карты дефектов ПП автоматически в процессе инспекции заносятся коды обнаруженных дефектов.

Нумерация ячеек определяется в АПАК (см. рис. 5):

- сплошная по горизонтали;
- по вертикали;
- структурированная с указанием номера строки и столбца для сложных таблиц карты дефектов ПП.

Размер ячеек определяется размером кристаллов с учетом прогнозируемой ширины шва разреза (или разлома) на этапе процесса разделения кристаллов.

В АПАК имеется возможность рассчитать число целых кристаллов с учетом радиуса пластины за вычетом максимальной высоты среза, необходимого для ориентации и обработки пластины (рис. 6–14).

В мировой практике определены шаблоны карты дефектов ПП. Каждый из них относится к уникальному типу со своим названием [9]:

- «Центральный» (рис. 6). Дефекты сосредоточены в центре ПП. Они могут возникнуть в результате проблем с механической и химической планаризацией – комбинациями способов удаления неровностей (полировки) с поверхностями изготавливаемых ПП;
- «Кольцевой» (рис. 7). Процесс изготовления ПП – «фотолитографический резист» состоит из операций грунтовки, покрытия резистом, пост-нанесения, экспонирования, пост-экспонирования, проявления спекания и пост-обжига. Используемые в процессах материалы требуют максимальной чистоты, особенно при покрытии и проявлении. Если эти требования не соблюдены, возникают дефекты, соответствующие шаблону типа «Кольцевой». При этом не исключается образование подобного шаблона в результате повторного осаждения растворенного фоторезиста обратно на поверхность ПП, что свидетельствует о сбоях в работе оборудования;
- «Локальный» (рис. 8). Возникновение дефектов этого типа объясняется чрезмерной вибрацией оборудования. Дефекты локального типа не имеют линейных или криволинейных характеристик, в отличие от дефектов типа царапин;
- «Локальный краевой» (рис. 9). Дефекты сосредоточены на краю ПП. Они могут возникать в результате выполнения процессов осаждения тонкой пленкой поверхностей ПП: адсорбции – начальной фазы, когда атомы материала осаждаются на поверхности;

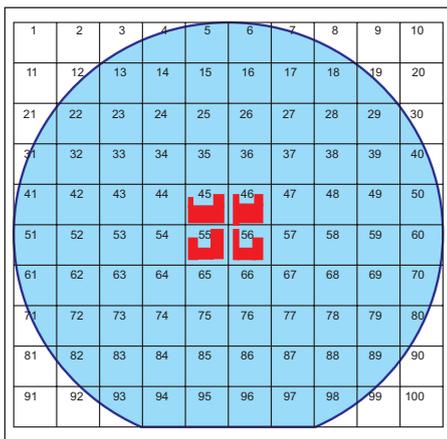


Рис. 6. Шаблон карты дефектов типа «Центральный»

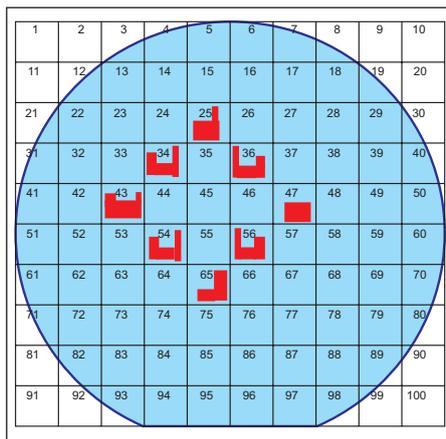


Рис. 7. Шаблон карты дефектов типа «Кольцевой»

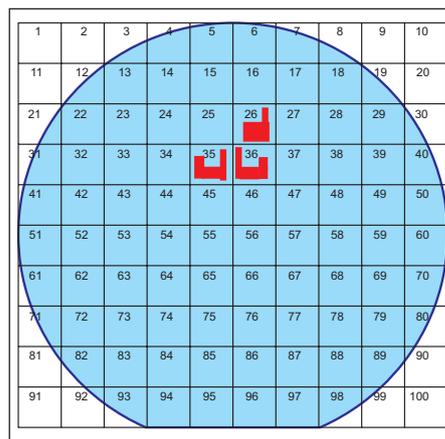


Рис. 8. Шаблон карты дефектов типа «Локальный»

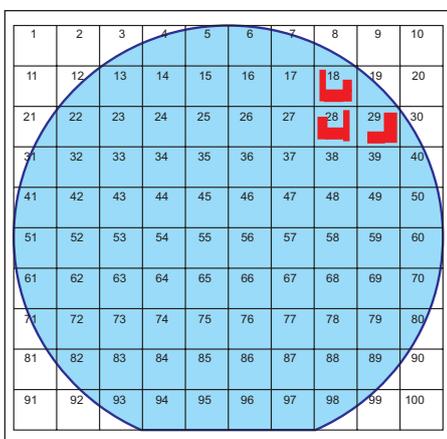


Рис. 9. Шаблон карты дефектов типа «Локальный краевой»

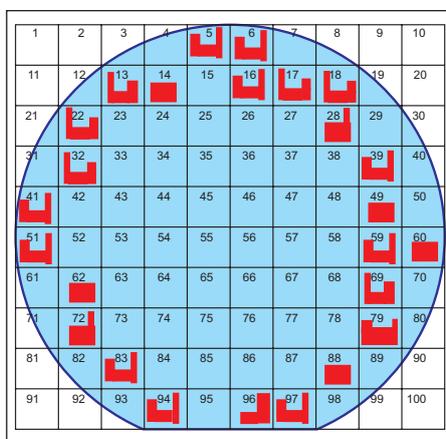


Рис. 10. Шаблон карты дефектов типа «Кольцевой краевой»

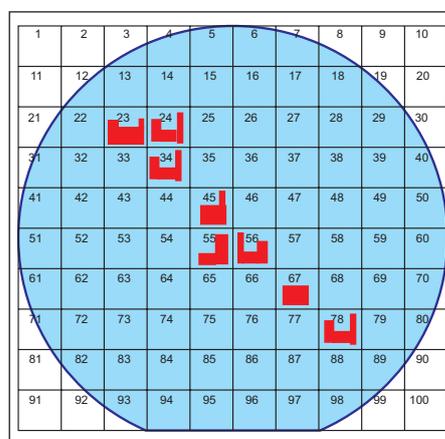


Рис. 11. Шаблон карты дефектов типа «Царапина»

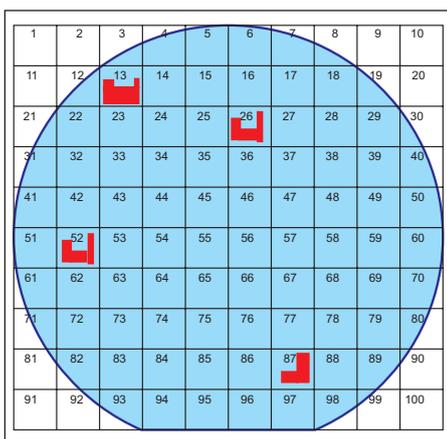


Рис. 12. Шаблон карты дефектов типа «Случайный»

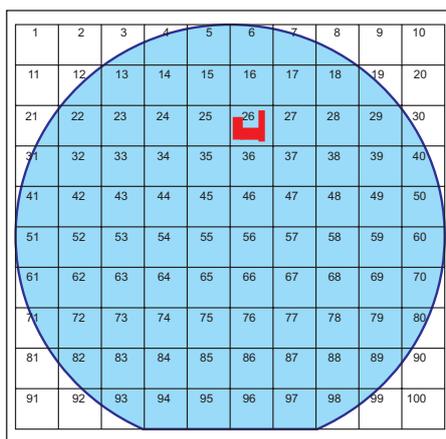


Рис. 13. Шаблон карты дефектов ПП типа «Чистый»

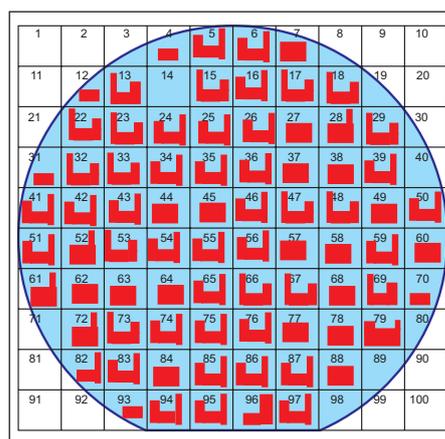


Рис. 14. Шаблон карты дефектов ПП типа «Полный»

диффузии – движения атомов по поверхности подложки; нуклеации – образования кластеров, которые преобразуются в непрерывную тонкую пленку. На образование дефектов влияют такие факторы как свойства материалов и параметры осаждения;

- «Кольцевой краевой» (рис. 10). Дефекты сосредоточены кольцом на краю ПП. Они могут возникать в результате проблем с травлением – удалением слоев в соответствии с рисунками, сформированными резистом. На образование дефектов влияют качество применяемых материалов и режимы работы оборудования;

- «Царапина» (рис. 11). Дефекты этого типа обычно образуются из-за ошибок персонала или неисправностей на этапах химико-механической полировки при транспортировке и обработке ПП;
- «Случайный» (рис. 12). Дефекты ПП можно в целом разделить на две категории: систематические и случайные. Систематические дефекты являются результатом сбоя в проектировании или производстве и несоблюдения передовых практик. Частоту систематических дефектов можно уменьшить за счет постоянного и строгого

улучшения процессов, в том числе контроля качества применяемых материалов.

Случайные дефекты, обусловленные процессом или условиями изготовления ПП. Частота случайных дефектов снижается путем глубокого анализа причин их возникновения. Появление случайных дефектов является предпосылкой возникновения их систематичности;

- «Чистый» (рис. 13). Количество дефектов этого типа минимальное. Однако необходима постоянная проверка ПП для своевременного выявления факта увеличения их числа и принятия соответствующих мер;
- «Полный» (рис. 14). Почти полное заполнение ПП дефектами может быть результатом сбоя процессов производства ПП. Большинство областей ПП неисправно и требует поэтапного анализа качества процессов изготовления ПП (фрагмент изображения ПП, отнесенной к типу «Полный», показан на рис. 15).

На практике также встречаются комбинированные шаблоны дефектов. Эти ПП с разными дефектами, обнаруженными в конце производственного пути, часто обрабатываются одними и теми же неисправными инструментами и оборудованием.

Эти примеры демонстрируют важность поддержания качества ПП на всех производственных процессах, начиная с погрузочно-разгрузочных машин и заканчивая системами контроля материалов и тестирования производственного оборудования.

Традиционное распознавание дефектов и классификация карты дефектов ПП, в основном, выполнялись опытными специалистами с помощью визуального контроля. Такой метод является дорогостоящим и нецелесообразным, когда наборы данных большие.

Анализ карт дефектов ПП дает информацию для выявления аномальных процессов, происходящих во время производства ПП, позволяет улучшить их производство и повысить качество продукции.

Выводы

Описанные в статье дефекты – не единственные, которые можно обнаружить с помощью АПАК на ПП. Другие подобные дефекты также можно выявлять с использованием этого комплекса.

Работа АПАК может распространяться на соединения ПП на основе SiC (карбида кремния), GaAs (арсенида галлия), InP (фосфида индия), GaN (нитрида галлия), AlN (нитрида алюминия) и AlGaIn (нитрида алюминия – галлия). Кроме того, АПАК позволяет обнаруживать дефекты подложки, даже когда она покрыта эпитаксиальным слоем, поскольку уникальной особенностью АПАК является то, что он может работать с эпитаксиальным слоем или без него. Таким образом, АПАК дает возможность определить распространение одних дефектов и их корреляцию с другими, позволяя установить связь между ними. АПАК обнаруживает дефекты, которые распространяются через подложку к эпитаксиальному слою и создают другие дефекты на поверхности этого слоя.

Хотя работа АПАК была описана с использованием конкретных терминов, такое описание носит исключительно иллюстративный характер. Следует понимать, что допускаются изменения и вариации без отступления от целей и задач наших разработок.

АПАК анализирует микроскопические изображения и обеспечивает их отслеживание для конкретного производственного процесса, создавая условия для определения первопричин и постоянного улучшения контроля качества ПП. При этом стандартизация процессов, требования к качеству определяются на этапах:

- производства слитков: строгие стандарты чистоты исходного сырья; жесткий контроль параметров процессов; современные покрытия тиглей;
- полировки ПП: многоступенчатые процессы с использованием тонкозернистых абразивов; автоматизированная обработка уменьшает царапины;
- нарезки ПП: применение материалов и инструментов минимизируют повреждения их поверхностей; контроль их состояния предотвращает появление трещин;

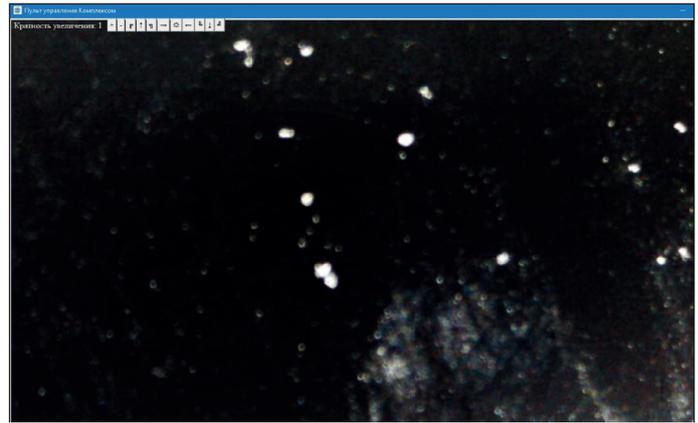


Рис. 15. Фрагмент изображения ПП, отнесенной к типу «Полный»

- очистки пластин: сверхчистые химикаты удаляют остатки; промывка ламинарным потоком предотвращает повторное загрязнение;
- хранения и обращения: все транспортные контейнеры тщательно очищаются; одежда персонала исключает осыпание на ПП сторонних частиц; хранение под положительным давлением блокирует загрязнение.

Ожидается, что представленные в этом исследовании результаты и применение АПАК внесут значительный вклад в разработку ПП, улучшат контроль качества ПП и эффективность производства ИЭТ.

Литература

1. Zhen Zhang, Min Xu, Fei Yu. Wafer Defect Detection Based on Polarization Modulation. Second Conference on Advanced Optical Manufacturing Technologies and Applications & Fourth Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing. 2024. Xi'an. China. November 2024.
2. Amit Nativ, Haim Feldman, and Natan T. Shaked. Wafer Defect Detection by a Polarization-Insensitive External Differential Interference Contrast Module. Department of Biomedical Engineering. Faculty of Engineering. Tel Aviv. Israel. 2018.
3. Shunta Harada, Kenta Murayama. Advances in Defect Characterization Techniques Using Polarized Light Observation in SiC Wafers for Power Devices. Center for Integrated Research of Future Electronics (CIRFE). Institute of Materials and Systems for Sustainability (IMaSS). Nagoya University. Furo-cho. Chikusa-ku. Nagoya. Japan. January 2025.
4. Akira Kawata, Kenta Murayama, Shogo Sumitani, Shunta Harada. Design of Automatic Detection Algorithm for Dislocation Contrasts in Birefringence Images of SiC Wafers. Center of Integrated Research for Future Electronics (CIRFE). Institute of Materials and Systems for Sustainability (IMaSS). Nagoya University. Nagoya. Japan. February 2021.
5. Zhen Zhang, Min Xu, Fei Yu. Wafer Defect Detection Based on Polarization Modulation. Fudan University (China). November 2024
6. Laura Peters. Defect Challenges Grow At The Wafer Edge. Semiconductor Engineering. September 2024.
7. Uzma Batool, Mohd Ibrahim Shapiai, Muhammad Tahir, Zool Hilmi Ismail. A Systematic Review of Deep Learning for Silicon Wafer Defect Recognition. University of Technology Malaysia. August 2021.
8. Songjie Liu, Jingxuan Cheng, Xiyin Wang, Shixiao Sun, Jing Xu. Design of Full Stokes Vector Polarimetry Based on Metasurfaces for Wide-Angle Incident Light. Photonics 10 (4). ISSN 2304–6732. Published by MDPI (Basel, Switzerland). March 2023.
9. Rajesh Doss, Jayabrabu Ramakrishnan, S. Kavitha, S. Ramkumar, G. Charlyn Pushpa Latha, Kiran Ramaswamy. Classification of Silicon (Si) Wafer Material Defects in Semiconductor Choosers Using a Deep Learning ShuffleNet-v2-CNN Model. Advances in Materials Science and Engineering. Open access journal. September 2022.