

# Некоторые проблемы современной метрологии в микроэлектронике

М. Макушин<sup>1</sup>, Мартынов, д. т. н.<sup>2</sup>

УДК 621.317 | ВАК 05.11.13

Метрология является одним из важных факторов развития микроэлектроники, ускорения разработки и производства новых приборов, повышения выхода годных. По мере масштабирования ИС и освоения 3D-структур перед средствами метрологии и контроля встают новые задачи и трудности. Важную роль в их дальнейшем совершенствовании играют искусственный интеллект, машинное обучение и совершенствование вычислительных технологий, а также увеличение числа датчиков, встроенных в технологическое оборудование и использование методов больших данных для обработки собранных ими данных.

Согласно данным исследования корпорации MarketWatch (Нью-Йорк, шт. Нью-Йорк, подразделение Dow Jones & Company), в течение следующих пяти лет рынок контрольно-измерительного оборудования (средства метрологии и контроля) для микроэлектроники будет расширяться со среднегодовыми темпами прироста в сложных процентах (CAGR) на уровне 7,9% – с 3,36 млрд долл. в 2019 году до 5,3 млрд долл. в 2024 году. Рынок данного оборудования достаточно высоко монополизирован – на трех ведущих поставщиков (KLA-Tencor, Hitachi High-Technologies и Applied Materials) приходится более 60% доходов отрасли. Но, тем не менее, рыночная конкуренция довольно жесткая – на рынке противостоят еще с десятком небольших фирм.

По типам контрольно-измерительных систем различают оптическое, электронно-лучевое и прочее оборудование, а по применению – оборудование для контроля пластин, кристаллов ИС, корпусов и т. д. Крупнейшим сектором данного оборудования являются средства проверки пластин – на них приходится более 70% продаж. Также важными секторами применения контрольно-измерительного оборудования являются корпусирование и тестирование ИС.

Современный рынок контрольно-измерительного оборудования обладает достаточно серьезными барьерами для выхода на него новых игроков: наличие больших финансовых ресурсов успеха не гарантирует, сегодня требуются технологические заделы и развитая цепочка поставок (от поставщиков материалов до конечных потребителей) [1].

## НОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ И КОНТРОЛЯ

Совершенствование вычислительных технологий сделало возможным появление новых методик метрологии и контроля, а также новых аналитических подходов к обнаружению минимальных отклонений в параметрах, в материалах и подсистемах по мере уменьшения топологических норм производимых и проектируемых полупроводниковых приборов. Особенно это важно при выявлении дефектов на полупроводниковых пластинах в процессе их обработки (при формировании транзисторных структур, элементов топологии и т. п.). Отмечается, что уменьшение размеров ИС и их элементов, появление новых материалов и средств более точного измерения поверхностных и приповерхностных характеристик приводят к неэффективности применения стандартных технологий метрологии и контроля. Традиционные стратегии метрологии становятся нежизнеспособными, не обеспечивают необходимую производительность измерений. Проблемами становятся низкая пропускная способность средств метрологии и контроля, их недостаточная чувствительность и разрушающие методы контроля. Проблемы с изменением характеристик материала не всегда связаны с его начальным качеством, а зачастую возникают именно в процессе измерений [2].

Нужно отметить, что и при проектировании/опытном производстве, и при серийном производстве демонстрируется существенный прогресс в использовании методов машинного обучения для совершенствования средств метрологии и контроля. В рамках методик машинного обучения объем обучающих данных всегда был большим. До сих пор использовались статические классификаторы, но дальнейшее развитие требует расширения подходов. В частности, применение рекуррентных нейронных сетей позволит ввести дополнительные

<sup>1</sup> ЦНИИ «Электроника», главный специалист, mmackushin@gmail.com.

<sup>2</sup> ФГБНУ «Аналитический центр», проф., Минобрнауки РФ, эксперт.

параметры и повысить точность обнаружения возможных системных сбоев [3].

Искусственный интеллект (ИИ), сам по себе, при использовании в средствах метрологии и контроля не приводит к формированию новой ценности. Но применение ИИ позволяет повысить точность измерений и увеличить скорость их проведения за счет автоматизации повторяющихся операций. При использовании ИИ в метрологии и контроле требуется формирование необходимой базы данных, без которых невозможно построить хорошие нейросетевые модели. Уникальность ИИ и машинного обучения заключается в способности быстро решать задачи большой размерности. Но существует и опасность: одновременное выполнение большого числа измерений с применением методик искусственного интеллекта и глубокого обучения может привести к снижению точности измерений и даже путанице при обработке результатов. Поэтому большое внимание уделяется методам визуализации и анализу наборов данных, что позволяет уменьшить общий объем необходимых для контроля данных, ускорить обнаружение проблемы, а также ускорить реализацию методик машинного обучения [4].

### Средства мониторинга и контроля, встраиваемые в технологический процесс

Одним из новых встраиваемых в технологический процесс/производственную линию средств мониторинга стала ИК-спектроскопия с Фурье-преобразованием (Fourier Transform Infrared, FTIR), традиционно используемая при проверке инструментальных средств. Высокие чувствительность и пропускная способность позволяют обеспечить быстрый анализ и обратную связь для обнаружения в реальном масштабе времени минимальных отклонений в свойствах полупроводниковых пленок, угрожающих производительности формируемых приборов или выходу годных.

Усовершенствованные средства аналитики позволяют извлечь новую информацию при использовании старой метрологии. За счет этого отпадает необходимость в применении передовых и дорогостоящих средств – и без них можно определить незначительные изменения в материалах, способных привести к возникновению дефектов на пластине. Современные расширенные вычислительные возможности позволяют проводить более сложный анализ получаемых при контроле данных и выявлять малые, но существенные различия в обрабатываемых материалах и готовой продукции.

Отмечается, что зачастую не нужно искать новую единицу измерения, а просто надо по-новому подойти к уже существующим показателям. Так, сертификат анализа (Certificate of Analysis, CoA) позволяет сократить множественные измерения до одного – показателя добротности (figure of merit, FoM) (рис. 1). Качество сырья может

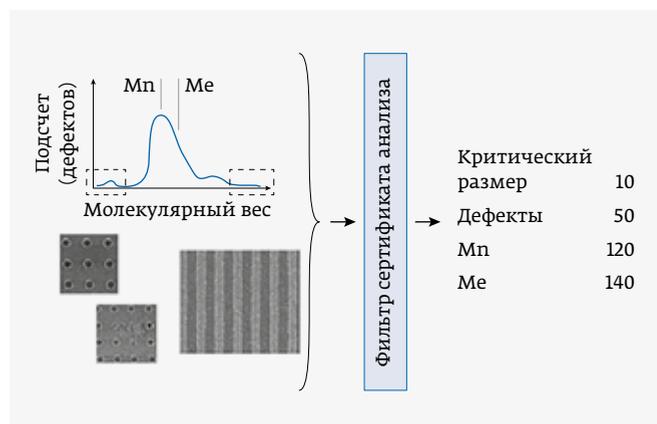


Рис. 1. Сертификат анализа (CoA) и диаграмма добротности (FoM). Источник: JSR Micro

оказывать существенное воздействие на производительность конечного прибора, но методики, применяемые для изучения характеристик распределения (например, молекулярной массы), были достаточно трудными. Сейчас подобные способы становятся проще и доступнее.

Значения диаграммы FoM, предоставляемые в CoA, не фиксируют минимальные изменения свойств исходных материалов. Уход молекулярно-весовых распределений в область среднего и среднеквадратичного отклонений снижает их ценность для анализа. В то же время изменения в минимальных отклонениях связаны с дефектами структур. Современные вычислительные возможности обеспечивают более целостные измерения, включая упреждающий анализ химической изменчивости материалов, связанных со специфическими дефектами формируемой структуры.

### Взаимодействие заводов по обработке пластин и поставщиков подсистем

Технологические процессы обработки пластин всегда отличаются незначительными вариациями, которые могут учитываться в спецификациях. Это может приводить к возникновению непредусмотренных отклонений на обработанной пластине. В некоторых случаях заводы по обработке пластин и их поставщики по отдельности могут не обладать всей полнотой информации, необходимой для полного представления о возможностях возникновения дефектов [2]. С целью изменения сложившейся ситуации, усугубляющейся по мере масштабирования, освоения новых приборных структур и материалов, SEMI в 2018 году создала новую группу по разработке электронных материалов (SEMI Electronic Materials Group, EMG) на основе объединения бывшей группы производителей химических препаратов и газов (Chemical & Gas Manufacturers Group, CGMG), группы производителей кремния (Silicon Manufacturers Group, SMG) и ряда

других формирований SEMI. Цель новой группы – совершенствование инфраструктуры полупроводниковых материалов, их дистрибьюции и оказания соответствующих услуг в рамках мировой микроэлектронной промышленности [5].

Отмечается, что на заводах по обработке пластин накоплен опыт и определенные информационные заделы относительно того, как определенные параметры материалов и оборудования могут воздействовать на производительность изготовителя ИС. Но при освоении новых технологических поколений часто возникает проблема «черного ящика», когда не понятно, где возникают несовместимости и трудности. В этих случаях важен обмен дополнительной информацией, позволяющей сузить поле поиска решений. Это важно и поставщикам подсистем – у них не всегда есть возможности узнать (своевременно) критические параметры и/или идеальные целевые значения процесса, используемого конкретным заводом по обработке пластин. Для продуктивного взаимодействия производителей ИС, материалов и оборудования протокол взаимодействия может оказаться очень полезным. Здесь возникают дополнительные трудности в области охраны прав интеллектуальной собственности и ноу-хау на фирменные вариации процессов, которые в среде со значительным числом поставщиков и потребителей не всегда удается своевременно решить.

Потенциальным решением проблемы является не просто создание стандартного и автоматизированного процесса обмена конкретными данными, а процесса, учитывающего «болевые точки» производителей полупроводниковых приборов, оборудования и материалов. На данный момент выработано общее представление о том, что поставщикам материалов и/или оборудования при заключении контракта необходимо делиться с заводами по обработке пластин дополнительной информацией о параметрах своей продукции, а заводы по обработке пластин, в свою очередь, должны информировать своих поставщиков, какие материалы и с какими параметрами им необходимы, чтобы обеспечить необходимую производительность. Для начала взаимодействия оптимальной может стать информация, не содержащая закрытых данных, но являющаяся полезной и действенной по срокам использования [2].

## ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ ПО МЕРЕ МАСШТАБИРОВАНИЯ И ОСВОЕНИЯ 3D-СТРУКТУР

В настоящее время изготовители ИС для измерения современных приборных структур используют несколько систем метрологии. При этом при переходе к каждому новому (меньшему) технологическому уровню метрология становится все более сложной и дорогой. Проблемы обострились, когда планарные транзисторы исчерпали возможности развития, что побудило изготовителей ИС

перейти к FinFET-транзисторам. Выбор FinFET-приборов обусловлен тем, что они, по сравнению с широко распространенной КМОП-технологией с планарными структурами, характеризуются значительно меньшим временем переключения и большей плотностью тока. Это действительно трехмерные структуры, напоминающие плавники рыбы (fin). Но трехмерность FinFET создает дополнительные технологические трудности в проведении процессов литографии, осаждения и травления слоев.

FinFET отличаются сниженным статическим током утечки, но при этом содержат ряд трехмерных структур и пленок, трудных для измерения. В некоторых случаях подобные структуры меньше ангстрема (0,1 нм). Таким образом, инструментальные средства метрологии должны не только осуществлять двумерные измерения, но и получать их в трехмерной среде рентабельным образом. Это объясняет, почему производители ИС для определения характеристик FinFET требуют более дюжины инструментальных средств метрологии.

На технологическом уровне 10/7 нм и менее сообщество метрологии сталкивается с дополнительными трудностями. С одной стороны, FinFET меньше, плотность их размещения значительно выше, при их производстве используются новые материалы. Таким образом, число методик метрологии для FinFET по сравнению с планарной технологией увеличивается в пять раз. Инструментальных средств FinFET-метрологии больше и по числу, и по типам. Это, соответственно, ведет к увеличению числа методик, нарастанию объема данных, увеличению издержек и времени цикла операций метрологии.

Более того, многие методики инструментальных средств метрологии приближаются к физическим пределам своих возможностей. Для преодоления подобной ситуации полупроводниковая промышленность продолжает разрабатывать новые инструментальные средства и методики метрологий. Так, например, в область методик и средств метрологии в последнее время входят гибридная метрология и средства машинного обучения.

Когда промышленность переходила от планарной технологии к FinFET, область метрологии изменилась в одночасье. Метрология планарных структур – это в основном измерение между двумя точками. В случае же FinFET речь идет о 3D-измерениях структур, обладающих верхней, средней и нижней частью. Кроме того, нужно замерять боковые поверхности.

По мере того, как FinFET распространяются на область 10/7-нм и 5-нм технологий, проблемы метрологии обостряются. FinFET становятся меньше, а сам «плавник» – тоньше и уже по ширине. Также новые вызовы обусловлены использованием новых материалов, что ставит перед метрологией очередные задачи. Например, при 5-нм топологиях технологический процесс насчитывает 1,1 тыс. этапов, метрологии приходится иметь



## Разработка и производство конденсаторов

### оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-74, K50-76, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-98

### объемно-пористые танталовые конденсаторы

K52-1, K52-1M, K52-1BM, K52-1B, K52-9, K52-11, K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24, K52-26(чип), K52-27(чип)

### оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

K53-1A, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип)

### суперконденсаторы (ионисторы)

K58-26

### накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001

Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, 3  
Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48, 4-27-53  
e-mail: [elecond-market@elcudm.ru](mailto:elecond-market@elcudm.ru), <http://www.elecond.ru>

дело с целой пластиной и неоднородностью воспроизведения структур.

Есть и другие проблемы – сложность методик многократного формирования рисунка привела к взрывному росту числа взаимодействий, требующих управления на уровне транзисторных технологий. Локальные межсоединения поверх FinFET чрезвычайно перегружены. Это приводит к сужению окна процесса\* по контролю размеров, величины допустимых погрешностей становятся все меньше. Даже самые небольшие вариации в допуске размера или допуске на выравнивание, возникающие вследствие многочисленных взаимодействий слоев литографии, могут привести к значительным колебаниям в сопротивлении межсоединений, что ограничивает эксплуатационные характеристики транзистора. Стандартные методики измерения подобных отклонений приводят к быстрому уменьшению площади кристалла ИС, доступной для измерений, – вследствие как размеров, так и растущего числа метрологических структур.

Изготовители ИС по-прежнему надеются начать использование EUV\*\*-литографии при производстве 7-нм и/или 5-нм ИС. Технология EUV-литографии является перспективной для использования в полупроводниковых процессах с шагом 36 нм и менее. Однако при рассмотрении вопроса ее использования в крупносерийном производстве остаются проблемы как экосистемного характера, так и возможностей собственно процесса, включая локальный разброс критических размеров, неравномерностей краев линии (резиста) и селективности шаблона.

Тем не менее, использование EUV-литографии обещает сократить число этапов технологического процесса. Количество этапов метрологии также может уменьшиться. Но могут возникнуть различные эффекты внутри поля изображения, о которых необходимо позаботиться с целью взять под контроль ошибку установки угла кристалла в заданное положение. Таким образом, интенсивность операций метрологии в пересчете на пластину, похоже, будет увеличиваться.

## Метрология критических размеров FinFET

Очевидно, что производители ИС сталкиваются с множеством проблем, особенно в области метрологии. Если брать планарную технологию, то поставщики ИС

обычно используют три инструментальных средства метрологии – сканирующий электронный микроскоп (SEM) для контроля критических размеров, эллипсометрию и системы совмещения. SEM для контроля критических размеров – одно из основных средств метрологии на заводах по обработке пластин, осуществляющее нисходящие измерения размеров структуры. Эллипсометрия является оптической методикой измерения пленок (в частности, их поверхности). Метрологические системы совмещения используются для обнаружения сдвигов положения между топологическими элементами и слоями прибора.

Когда в период 2000-х годов FinFET находились на этапе НИОКР, изготовители ИС обнаружили, что существующие методы метрологии неэффективны, так как они обеспечивали только двумерные измерения. Однако для FinFET производителям ИС требовались трехмерные данные. Соответственно, производители начали инвестировать в метрологию и решили свои задачи на начальном этапе освоения FinFET-технологии. Поставщикам ИС требовалось больше, чем три инструментальных средства метрологии – де-факто им требовалась дюжина или более различных типов подобных средств.

На уровне 10/7-нм и 5-нм технологий число типов инструментальных средств метрологии увеличивается, но не без проблем. Метрология столкнулась с двумя вызовами – чувствительностью и быстродействием. И до сих пор эти проблемы не решены. Большое число технологий позволяет осуществлять меньшее количество измерений, но при освоении ближайших технологических уровней основной узким местом станет именно быстродействие метрологических систем. Для изготовителей ИС на FinFET-приборах требуются инструментальные средства в пяти основных категориях – измерение критических размеров, состава измеряемых структур, наличие легирующих примесей, напряженных состояний и электрических характеристик. Каждая из категорий предусматривает наличие нескольких различных типов инструментальных средств метрологии как в лабораторных, так и в заводских условиях (рис. 2).

Метрология критических размеров (линейные и угловые измерения) используется для различных измерений структур, таких как высота, длина и ширина. Планарные транзисторы требуют от 5 до 6 измерений, и растровая электронная микроскопия критических размеров вполне справляется с этой задачей. В случае FinFET требуется уже 12 или больше измерений с применением сканирующей электронной микроскопии для оценки критических размеров (CD-SEM), таких как высота затвора, высота плавника, ширина плавника и угол (наклона) боковой поверхности (sidewall angle, SWA). При этом измерения проводятся на наноуровне, поэтому, помимо CD-SEM, требуются и другие методики

\* **Process window** – окно процесса, набор значений параметров процесса изготовления ИС при желаемых спецификациях. Например, окно процесса литографии обычно определяется как набор пунктов (фокус, экспозиция и т. д.) для контроля разбросов критических размеров в пределах 10%.

\*\* **EUV (extreme ultraviolet)** – наиболее коротковолновая часть ультрафиолетовой области спектра (предельной УФ-области спектра). Длина волны излучения EUV-степперов 13,5 нм.



ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Акционерное общество  
«Научно-производственное предприятие  
«Электронное специальное  
технологическое оборудование»

124460, г. Москва, Зеленоград,  
Георгиевский проспект, д.5, стр.1  
тел.: (499) 729-7751, факс: (499) 479-1239  
info@nppesto.ru www.nppesto.ru

СИСТЕМА GROOVY ICP –  
ТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГО  
Для критического травления  
диэлектриков на основе уникального  
узкозазорного индуктивного плазменного  
реактора для массового производства

МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



Разработка АО «НПП «ЭСТО» при финансовой поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации

Приглашаем посетить наш стенд №А4065 на выставке «ElectronTechExpo 2020», которая пройдет с 14 по 16 апреля в павильоне №3 МВЦ "Крокус Экспо"



Оборудование для лазерной микрообработки:  
резка, фрезерование, скрайбирование,  
прошивка отверстий



Оборудование  
для нанесения фоторезиста



Оборудование для измерения физических  
и геометрических параметров



Сборочное оборудование

метрологии. CD-SEM обеспечивает некоторые измерения FinFET, но ее применение связано с некоторыми ограничениями.

Другими словами, в случае FinFET изготовители ИС используют CD-SEM в дополнение к другим инструментальным средствам метрологии, которые, в свою очередь, обладают собственными ограничениями. В общем, для измерения FinFET требуются четыре различных типа инструментальных средств метрологии критических размеров – атомно-силовая микроскопия (AFM), CD-SEM, скаттерометрия и просвечивающая электронная микроскопия (TEM). Скаттерометрия, технология оптического измерения критических размеров (optical CD, OCD), измеряет изменения интенсивности светового излучения. TEM для измерения образца просвечивает структуру пучком электронов.

В условиях завода по обработке пластин измерения критических размеров осуществляются на различных этапах технологического процесса. Каждый из этих этапов может требовать использования другого (по сравнению с предыдущим этапом) или различных типов инструментальных средств метрологии. Решение об использовании того или иного средства зависит от применения, пропускной способности (производительности) и цены.

Каждая из технологий обладает как преимуществами, так и ограничениями. CD-SEM обеспечивает некоторые, не все измерения. AFM предоставляет измерения высокой разрешающей способности, но отличается низкой производительностью. OCD может измерять в FinFET критические размеры, профили и толщину пленок. Это быстродействующая методика, однако ей присущи некоторые недостатки. OCD является методикой на основе модели. Во многих случаях это инструментальное средство не измеряет фактический прибор. Вместо этого измеряются суррогатные или простые планарные структуры, изображающие физические приборы и действующие как они. Соответственно, данные измерений этих структур и фактических приборов должны соответствовать друг другу или коррелироваться.

OCD была вполне приемлема для предшествующих технологических уровней, но сейчас с ней возникают проблемы из-за 3D-структур и изменчивости параметров. При измерении только суррогатных структур измеряется 0,01% площади всей пластины, а на производственной линии осуществляются тысячи этапов технологического процесса. Если на каждом измерять только 0,01% или менее площади пластины в целом, возникает большая проблема. Действительно, производителю ИС

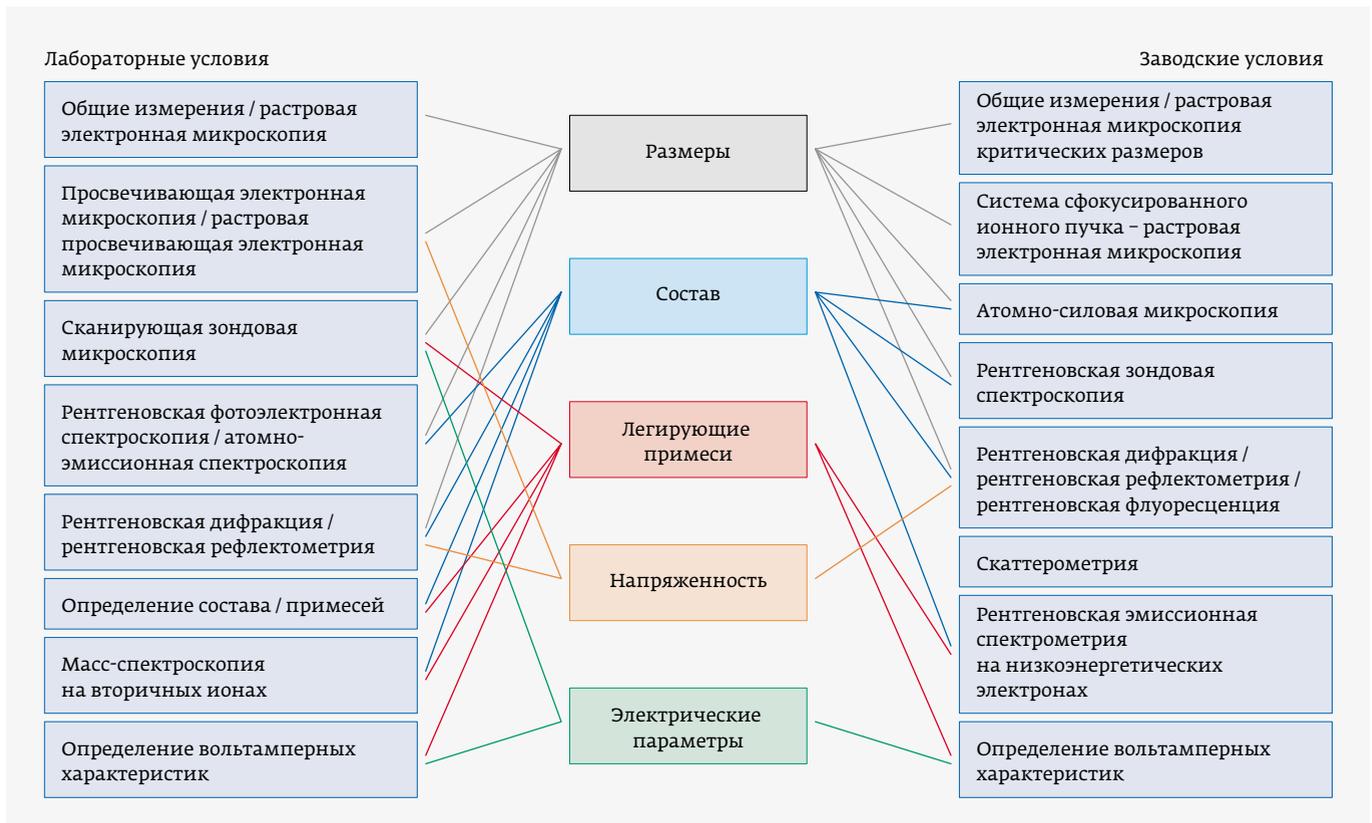


Рис. 2. Основные технологии метрологии, используемые в лабораторных и заводских условиях.

Источник: GlobalFoundries / NIST



## ИНТЕЛЛЕКТ. КАЧЕСТВО.

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»  
Москва, Щелковское шоссе, д.5, стр.1  
Тел. (499) 644-21-03, (499) 644-25-62  
(многоканальный)  
Факс +7(499) 644-19-70  
E-mail: [mwsystems@mwsystems.ru](mailto:mwsystems@mwsystems.ru)  
[www.mwsystems.ru](http://www.mwsystems.ru)

- СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНОЛОГИИ
- ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА/КАЧЕСТВО
- ПОЛНЫЙ СПЕКТР УСЛУГ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРОИЗВОДСТВУ МОНОЛИТНЫХ И ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА (0,3 - 22 ГГц)

## АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»



может требоваться измерение нескольких параметров. Но иногда результаты различных измерений могут не совпадать, что, в свою очередь, влияет на выход годных приборов.

OCD сталкивается и с другими проблемами. По мере масштабирования приборов оптическая величина некоторых критических характеристик становится весьма малой, например, из-за округления верхнего угла. Таким образом, теряется чувствительность к этим параметрам, что усложняет кросс-корреляционные проблемы.

В идеале с помощью OCD производители ИС желают получить фактическую структуру, а не прокси-мишени. Подстраиваясь под эти потребности, поставщики инструментальных средств OCD добились определенного прогресса, при этом они намерены развиваться далее, используя скорее революционные, а не эволюционные инновации.

Надо отметить, что для измерения какого-либо параметра, как правило, используют комбинацию двух или более инструментальных средств. Это называется гибридной метрологией. Например, для определенного этапа технологического процесса может потребоваться сочетание AFM, CD-SEM и OCD. Как правило, CD-SEM работает с OCD или AFM с OCD. Затем, для получения лучших результатов берутся и объединяются данные двух или более инструментальных средств. При этом термин «гибридная метрология» подразумевает самые различные сочетания методик. Наиболее простое и широко распространенное в отрасли применение гибридной метрологии – обеспечение прямой и обратной связи. Например, данные измерений одного инструментального средства используются для стабилизации решения второго. Гибридный подход также может использоваться для объединения данных, полученных разными метрологическими установками, с целью предсказания параметров процесса. В этом случае гибридный подход будет содействовать развитию другой методики.

Между тем, есть и другое решение – ТЕМ. Оно позволяет потребителю измерить фактическую структуру, но требует много времени и является разрушающим методом. Потребитель должен разрезать пластину и изучить поперечное сечение структуры с помощью ТЕМ. По этой причине ТЕМ ранее использовались главным образом в лабораторных условиях, но сейчас ситуация меняется. С переходом на FinFET методика ТЕМ получила значительный импульс развития, так как она обеспечивает визуализацию подповерхностной области этих сложных трехмерных структур на атомарном уровне. Как и следовало ожидать, по мере масштабирования метрология на основе ТЕМ в сфере FinFET продолжает использоваться в основном на таких начальных этапах процесса обработки пластин, как формирование плавников,

выращивании эпитаксиальных слоев и формировании затворов. В результате этих возможностей ТЕМ встраиваются в технологический процесс производственных линий по обработке пластин. Некоторые трудноразличимые ТЕМ-метрологией явления процесса могут быть изучены при помощи других методик метрологии.

## Метрология пленок

Помимо измерения критических размеров, проблемы существуют и в **других четырех сегментах метрологии** – определении состава, легирующих примесей, напряженности и электрических параметров.

Сегмент метрологии состава подразумевает измерение толщины и состава пленок. В этих целях производители ИС используют перспективную форму эллипсометрии. Созданное на ее основе инструментальное средство «спектроскопический эллипсомер с переменным углом» осуществляет измерения в диапазоне длин волн от УФ до ИК.

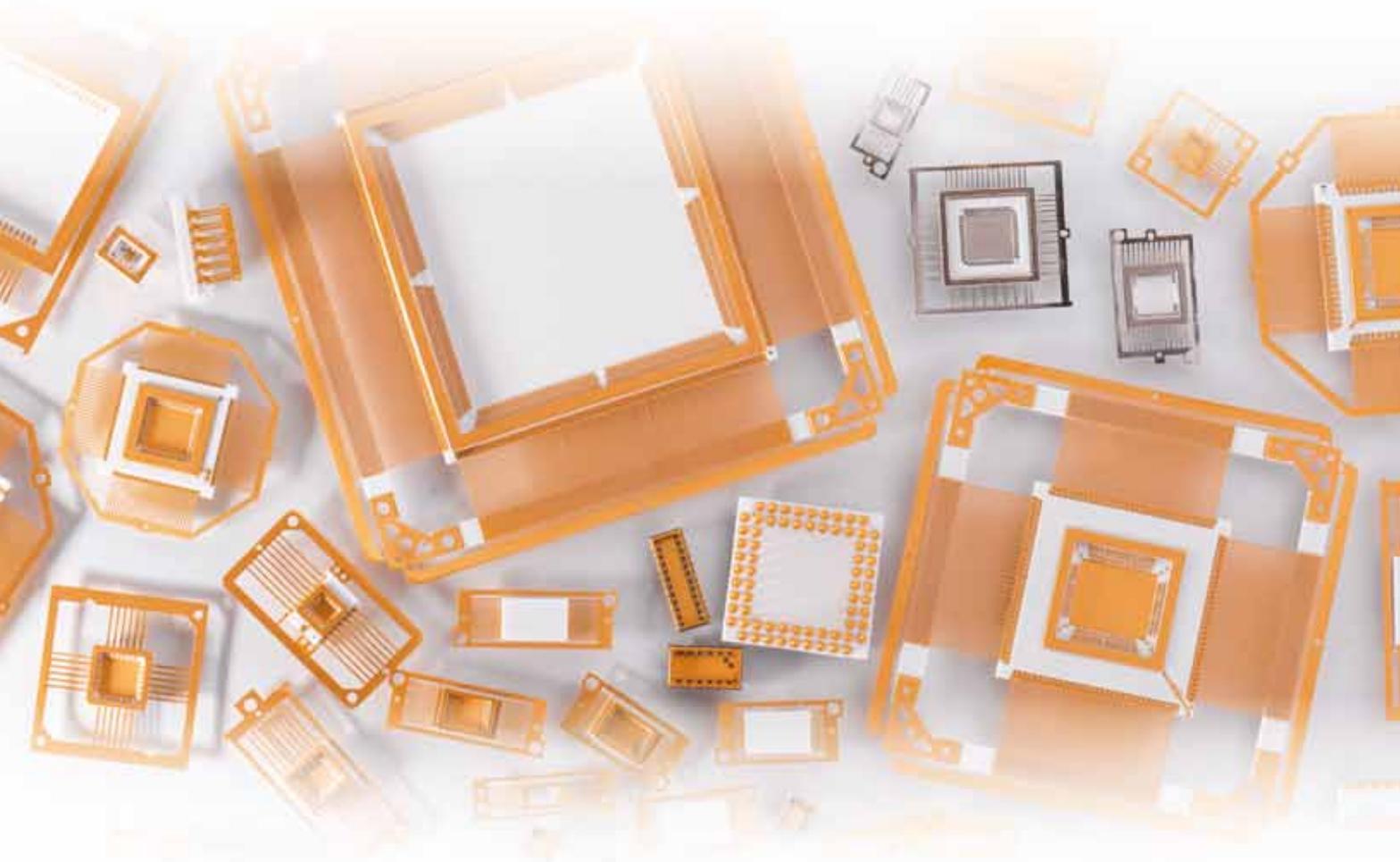
Кроме того, производители ИС применяют различные рентгеновские методы для определения состава приборов, такие как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS). XPS работает медленнее, чем оптические инструментальные средства, но обеспечивает высокую точность измерений. Основная проблема в том, что эта методика по-прежнему предназначена для измерения планарных поверхностей. Тем не менее поставщики инструментальных средств метрологии и производители ИС ведут работы по обеспечению измерения при помощи данной методики приборных структур. Предполагается, что вскоре XPS можно будет использовать для измерения не только 2D-, но и 3D-приборов.

Помимо XPS производители ИС используют в области определения состава приборов / материалов другие рентгеновские методики – рентгеновскую дифракцию (XRD), рентгеновскую рефлектометрию (XRR) и рентгеновскую флуоресценцию (XRF). XRF определяет элементный состав материалов. XRR осуществляет измерения тонких пленок. XRD, которая используется для изучения монокристалльных и тонких пленок, также применяется для изучения состава и напряженности материалов в приборе. К тому же, для определения легирующих примесей некоторые изготовители могут задействовать рентгеновскую эмиссионную спектрометрию на низкоэнергетических электронах (LEXES).

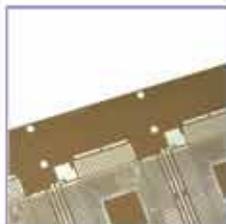
Многие рентгеновские инструментальные средства являются отдельными решениями. Однако их главная проблема – низкая производительность. Кроме того, проблема некоторых подобных средств – источники излучения. Они не всегда обладают достаточной яркостью для масштабирования, обеспечивающего использование инструментальных средств на их основе в условиях крупносерийного производства ИС.

ЙОШКАР-ОЛА, РЕСПУБЛИКА МАРИЙ ЭЛ

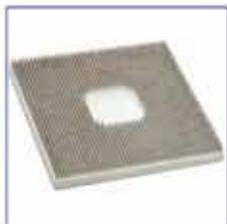
## **АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЗАВОД ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ»**



**Предприятие располагает научно-технической и испытательной базой для проведения исследований, разработки и выпуска новой продукции**



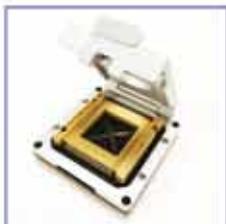
Выводные рамки



Металлокерамические корпуса



Нагревательные элементы



Контактные устройства



Графитовая оснастка



Оптоэлектронные корпуса



424003, Россия, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26  
Тел.: +7-8362-45-70-09, 45-67-68.  
info@zpp12.ru marketing@zpp12.ru

zpp12.ru

## НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В МЕТРОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Очевидно, что метрологическое сообщество сталкивается с рядом проблем, связанных с недостаточным развитием существующих средств и методик. С целью их преодоления разрабатываются новые решения.

В области CD-SEM продолжаются эволюционные улучшения. В метрологии критических размеров корпорации Applied Materials и ASML разрабатывают новый класс инструментальных средств на основе использования электронных лучей. Подобные системы, получившие название «массовые средства контроля критических размеров», сочетают в себе возможности электронно-лучевого измерения, CD-SEM и средств контроля совмещения.

В течение многих лет отрасль разрабатывает рентгеновскую скаттерометрию с малым углом (CD-SAX). Используя источник рентгеновского излучения, CD-SAX измеряет разброс шага (элементов).

Предполагалось, что CD-SAX заменит OCD, но этого пока не произошло. Мощность источника рентгеновского излучения CD-SAX еще недостаточна, размер пучка излучения не подходит для логических приборов. Вместо этого CD-SAX находит применение при изготовлении схем памяти. Корпорация Lam Research и Национальный институт стандартов и технологии США (NIST) в 2018 году представили доклад об использовании CD-SAX для контроля жестких масок<sup>\*</sup> на аморфном кремнии. Разработчики утверждают, что благодаря CD-SAX они смогли измерить профили 2D- и 3D-структур, получив подробную информацию. Жесткие маски на основе аморфного кремния играют важную роль при производстве устройств памяти. Соответственно, давно требовалась новая методика метрологии, способная обеспечить успешную аттестацию подобных структур.

Еще один **метод, начинающий применяться в метрологии – машинное обучение**. Это новый метод, который использует алгоритмы для решения некоторых проблем и настройки параметров метрологии. Данная методика предназначена для технологических уровней с топологиями 7 нм и менее. Недавно фирмы GlobalFoundries и Nova представили результаты исследования по использованию

машинного обучения в качестве дополнительного метода к OCD. Используя машинное обучение, исследователи продемонстрировали способность предсказывать критические размеры плавников на основе данных встроенных в производственную линию измерительных средств. Они, используя данные как OCD, так и электрических тестов, также предсказали электрическое сопротивление в межсоединениях.

Машинное обучение не заменит инструментальные средства метрологии, но поможет решить самые сложные задачи. Производителям ИС, в целях обеспечения высокого выхода годных, на технологических уровнях 10/7 нм и менее, будет требоваться избыточность метрологических систем. Очевидно, что в обозримом будущем проблем у метрологов не уменьшится [6].

## Перспективные методики метрологии и тестирования с точки зрения повышения выхода годных

Важным аспектом совместного использования средств метрологии и тестирования является задача повышения выхода годных. Чем раньше будет замечено возникновение дефектов и / или отклонений параметров технологического процесса, тем легче и дешевле их исправление. Обнаружение дефектов и отклонений на поздних этапах технологического процесса не всегда позволяет выявить их источник. Кроме того, чем позднее дефект обнаружен, тем более затратно исправление последствий (а иногда и невозможно), что может привести к снижению выхода годных.

К наиболее эффективным методикам метрологии и тестирования в этом плане можно отнести способы проектирования под эксперимент (design of experiment, DoE), совместной оптимизации технологии и проектирования (designd-technology co-optimization, DTCO), самовыравнивания в процессе многократного формирования рисунка с самосовмещением (self-aligned multi-patterning, SAMP) и т. д.

Один из новейших подходов к увеличению выхода годных является использование в метрологии **технологий больших данных**. По мере роста числа транзисторов на кристалле, этапов проектирования, отладки, верификации, контроля технологического процесса возникает все больший объем данных, которые благодаря оптимальному их использованию помогут совершенствовать производственный процесс. Общепринятого подхода еще не выработано, но производители признают данное направление перспективным и готовы тратить на развитие подобных методик значительные средства [7].

\* \* \*

Дальнейшее развитие методик и средств метрологии встречается с новыми проблемами – по мере дальнейшего

\* **Hard mask** – жесткая маска, используемая в полупроводниковой обработке в качестве маски травления вместо полимеров или прочих органических «мягких» материалов. Полимерные маски легко стравливаются кислородом, фтором, хлором или другим химически активным газом, что приводит к быстрой деградации рисунка, определяемого использованием полимерного шаблона, во время плазменного травления. Жесткая маска (или ее часть) может использоваться многократно, что расширяет возможности формирования топологического рисунка в технологических слоях.

масштабирования ИС и освоения 3D-структур. Преодоление этих трудностей возможно как за счет организационных, так и за счет технологических мер. К первым можно отнести расширение сотрудничества всех участников цепочки поставок ИС, а также совместные работы на уровне отраслевых ассоциаций, таких как SEMI. Ко вторым – освоение новых методик метрологии и измерений, использование искусственного интеллекта и машинного/глубокого обучения, совершенствование вычислительных технологий и применение методов больших данных. Метрология и контрольно-измерительная аппаратура, по мере дальнейшего усложнения технологических процессов, играет все более важную роль в обеспечении высокого качества продукции, повышения выхода годных, сокращении сроков разработки освоения новой продукции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Semiconductor Inspection Equipment Market Size (Global Industry Analysis, Segments, Top Key Players, Drivers and Trends to 2024). MarketWatch, Feb 15, 2019. <https://www.marketwatch.com/press-release/semiconductor-inspection-equipment-market-size-global-industry-analysis-segments-top-key-players-drivers-and-trends-to-2024-2019-02-15>.
2. **Doe P.** Materials and subsystem suppliers find solutions to emerging defectivity issues at small geometries. Solid State Technology. The Pulse. 2018. July 06. <https://electroiq.com/2018/06/materials-and-subsystem-suppliers-find-solutions-to-emerging-defectivity-issues-at-small-geometries/>
3. **Merritt R.** AI Expands Role in Design // EE Times. 1.31.2018. [https://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1332917](https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1332917)
4. **Sharma R.** How to add machine intelligence or AI to EDA tools // Solid State Technology. Wafer News. January 30. 2019. <https://electroiq.com/2019/01/how-to-add-machineintelligence-or-ai-to-eda-tools/>
5. SEMI launches Electronics Materials Group to serve \$69B industry. Solid State Technology. The Pulse. June 28. 2018. <https://electroiq.com/2018/06/semi-launches-electronics-materials-group-to-serve-69b-industry/>
6. **LaPedus M.** FinFET Metrology Challenges Grow. Semiconductor Engineering, May 17th, 2018 <https://semiengineering.com/finfet-metrology-challenges-grow/>
7. **Макушин М., Мартынов В.** Повышение надежности и выхода годных: традиционные и новые подходы // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 5 (00186). С. 56–66.

