

Интеллектуальные производства и технологии как условия решения проблем с оборудованием по мере масштабирования ИС

М. Макушин¹

УДК 621.37 | ВАК 05.27.06

По мере масштабирования ИС усугубляются проблемы, связанные с использованием производственного оборудования. К ним относятся выход годных, изменчивость параметров процесса и аппаратуры, сопряжение устройств различных поставщиков (и даже одного и того же). Отрасли пока не удастся добиться координации в сфере методов измерения дефектов, характерных для компонентов, подкомпонентов и подсистем. Один из путей преодоления подобных проблем – использование искусственного интеллекта и создание соответствующих производств.

ОБЩИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Процесс производства полупроводниковых приборов достиг пределов масштабирования в плане уменьшения топологических норм. Для сохранения конкурентоспособности корпорации вынуждены создавать и поддерживать новейшие производственные мощности и технологические процессы. Достижения в области облачных вычислений, обработки данных и системной интеграции становятся ключом к широкому внедрению интеллектуального производства.

Недавно SEMI^{*} провела форум по вопросам развития искусственного интеллекта и интеллектуального производства (AI and Smart Manufacturing Forum), по итогам которого был сделан ряд выводов.

Интеллектуальное производство – ключ к цифровой трансформации

Концепция Industry 4.0^{**} предусматривает использование автоматизации в целях удовлетворения потребно-

стей клиента и повышения эффективности, что будет способствовать принятию оптимальных стратегических решений в области производства. Успешная цифровая трансформация предприятий, выпускающих электронику, должна начинаться с НИОКР, ориентированных на оптимизацию процессов, разработку инновационных бизнес-моделей и анализ данных, поддерживающих цели и ценности бизнеса их заказчиков. Цифровизация является критическим фактором для производителей с точки зрения расширения клиентской базы, повышения производительности и создания новых возможностей получения дохода.

Цифровизация производства будет обеспечиваться благодаря мощным возможностям анализа данных

По мере того как разработчики продукции ориентируются на меньшие объемы производства, фирмам-изготовителям требуется мощное ПО анализа данных для быстрого решения проблем, интеграции различных типов оборудования и повышения эффективности управления предпринимательской деятельностью, планирования ресурсов на уровне бизнес-операций, маркетинга и сервиса.

Цифровая трансформация будет стимулировать рост доходов

Основные концепции интеллектуального производства – подключение к сетям и анализ данных. Производители заинтересованы в их реализации, поскольку это условия

настройки для производства собственных продуктов, до компаний, поставляющих индивидуальные продукты потребителям).

¹ АО «ЦНИИ «Электроника», М. Макушин, главный специалист.

* SEMI (Semiconductor Equipment and Material International) – международная организация поставщиков оборудования и материалов для производства полупроводниковых приборов.

** Industry 4.0 (The Fourth Industrial Revolution) – 4-я промышленная революция, ожидаемое массовое внедрение киберфизических систем в производство и обслуживание потребностей человека, включая быт, труд и досуг. Также это производственная сторона, эквивалентная ориентированному на потребителей Интернету вещей. Один из аспектов Industry 4.0 – сервис-ориентированное проектирование (от заказчиков, использующих заводские

не только повышения эффективности управления объектами и планирования производственными линиями, но и сохранения приемлемого роста доходов [1].

ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ВЫХОДА ГОДНЫХ ПРИ МАСШТАБИРОВАНИИ ИС

При изготовлении новейших ИС (например, логических) число операций переноса пластины с одной единицы оборудования на другую в рамках завода по их обработке может достигать до одной тысячи и более. Любая погрешность на какой-либо установке или при выполнении технологического процесса может привести к возникновению дефектов, а следовательно, к снижению такого важного показателя, как выход годных. Причинами этого могут быть самые незначительные недочеты в настройке оборудования или неисправности в любой подсистеме оборудования. Особенно актуальна данная проблема при переходе на топологии 10/7 нм.

Компоненты и подсистемы оборудования (а их может быть до 50 тыс. узлов и элементов от десятков поставщиков) заводов по обработке пластин играют одну из решающих ролей в цепи поставок полупроводниковых приборов. Цепочка поставок полупроводниковой промышленности претерпевает изменения: если еще недавно поставщики оборудования выдавали спецификации поставщикам компонентов, то сейчас они ведут совместные работы и взаимодействуют с изготовителями ИС, чтобы предотвратить на раннем этапе потенциальную угрозу целостности технологического процесса завода по обработке пластин. То есть опыт многолетнего (более четырех десятилетий со дня первого подобного соглашения) сотрудничества изготовителей ИС и поставщиков оборудования теперь расширен и на поставщиков отдельных узлов и компонентов.

Для решения подобных проблем в SEMI создана специальная группа по полупроводниковым компонентам, инструментальным средствам и подсистемам SCIS (Semiconductor Components, Instruments, and Subsystems, SCIS), которая разрабатывает новые стандарты и методы измерения дефектов, привносит узлами и компонентами оборудования.

Проблемы на уровне завода по обработке пластин

Отличительная черта современных заводов по обработке пластин – высокая сложность. По данным Калифорнийского университета (Беркли), теоретически завод (линия) мощностью 50 тыс. пластин (начинает обрабатываться в месяц) требует следующего набора оборудования:

- 50 сканеров/установок пошаговой литографии, а также механизмы перемещения пластин и средства отслеживания этих перемещений;

- 10 высокоточных и 8 среднеточных установок ионной имплантации;
- 40 установок травления;
- 30 установок химического осаждения из паровой фазы (ХОПФ).

Следует учитывать, что заводы по обработке пластин диаметром 300 мм – это высокоавтоматизированные производства, на которых используется широкий ассортимент устройств загрузки/перемещения материалов и механизмов перемещения пластин (рис. 1).

Основной тип оборудования для перемещения пластин между единицами оборудования – унифицированные подвесные обтекаемые контейнеры с загрузкой/выгрузкой пластин через фронтальную часть (FOUP). В них может поддерживаться среда с чистотой более высокого класса, чем общая среда чистой комнаты. Это позволяет доставлять пластины к очередной единице оборудования без загрязнений и использовать чистую комнату более низкого класса (для сокращения издержек). На одном уровне чистой комнаты, как правило, используются средства хранения материалов/инструментов малогабаритного типа, а для перемещения материалов между уровнями – лифтовые системы. При работе на нескольких уровнях применяются многоярусные системы, вращающиеся стеллажные системы, обеспечивающие максимальную емкость хранения при минимальной занимаемой площади.

Проблемы инструментальных средств: дефекты, метрология, неисправности

При масштабировании инструментальные средства на заводе по обработке пластин имеют дело со все меньшими топологическими нормами, требующими более точного соблюдения минимальных размеров элементов. Соответственно, на каждом новом технологическом уровне размер дефектов уменьшается, усложняется их поиск, что требует применения новых, более совершенных методик метрологии. **Сейчас при переходе к каждому новому технологическому поколению площадь кристалла уменьшается примерно на 50%, и вскоре на заводах по обработке пластин будет применяться примерно 30 методик метрологии.**

Несмотря на все усилия по организации контроля, **дефекты могут возникать на любом этапе технологического процесса.** Неполомки с инструментальным средством могут привести к появлению всевозможных проблем. Обнаружение и устранение неисправностей инструментального средства – это сложный, трудоемкий и дорогостоящий процесс, несмотря на то, что у каждой единицы оборудования свой график профилактического обслуживания, которое осуществляет завод (для этого есть определенный объем запасных частей) или поставщик (по контракту при покупке оборудования). Например,

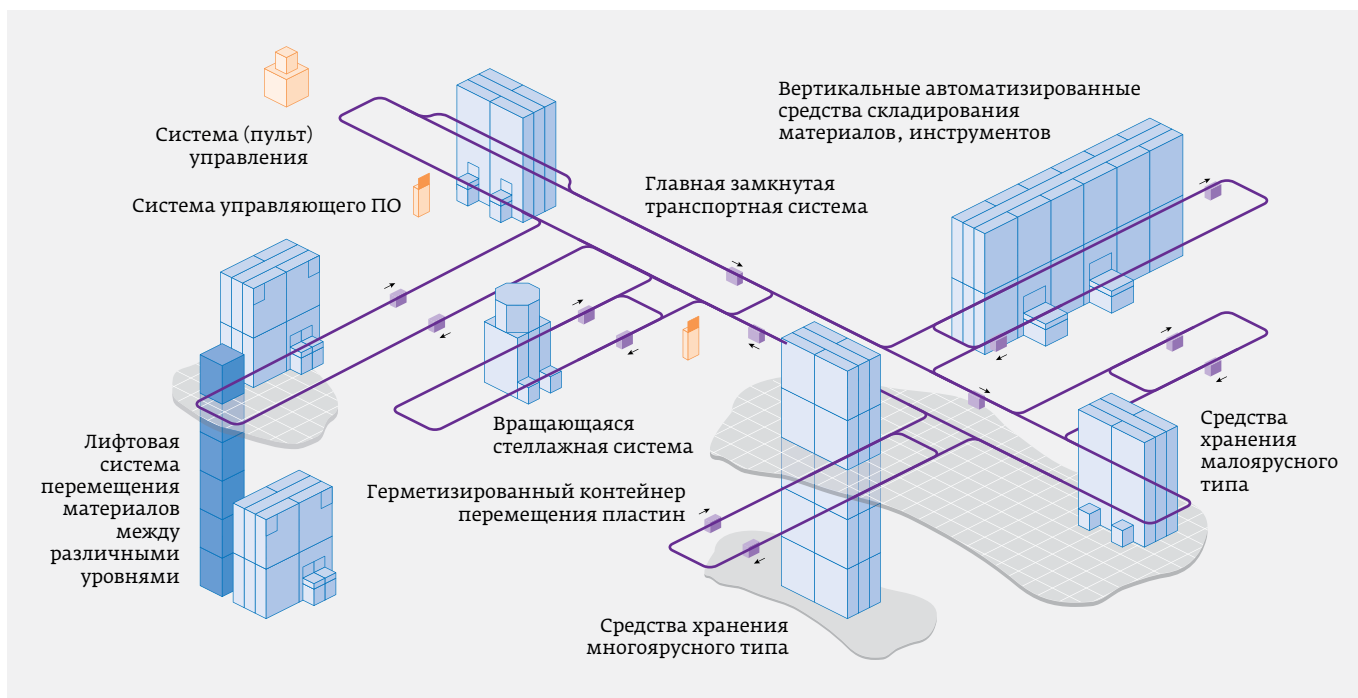


Рис. 1. Унифицированная транспортная система завода по обработке пластин. Источник: Daifuku

компонент может не только неисправно работать в системе, но и выходить из штатного режима из-за проблем с технологическим процессом.

Число компонентов в системах различается, и наиболее сложные инструментальные средства могут содержать огромное число узлов. Так, система аттестации шаблонов AIMS фирмы Zeiss для применения в EUV*-литографии содержит 4,5 тыс. подсистем и 64,0 тыс. компонентов от 134 различных поставщиков. Эта наиболее современная система на рынке характеризует сложность современных инструментальных средств. Если в системе AIMS возникли проблемы с оценкой поля экспонирования, то теоретически это может быть вызвано неисправностью одного или нескольких узлов и компонентов, комплектующих систему. И чем большее число элементов системы неисправно, тем сложнее задача ее отладки/восстановления.

По мере освоения производителями ИС технологических уровней 10/7 нм и менее уменьшаются и даже исчезают **допуски на ошибки в технологическом процессе завода по обработке пластин**. Одновременно возрастают требования к вариабельности процесса в пределах сроков использования технологического оборудования между этапами технического обслуживания, уже сточаются контроль, ограничения по спецификациям и операциям.

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

Тем не менее, преодолеть эти трудности можно. С точки зрения компонентов / подсистем для полупроводниковой промышленности предлагается несколько решений:

- активизация сотрудничества в цепи поставок;
- развитие программ обеспечения качества поставщиками компонентов;
- разработка базовой системы показателей и стандартов тестирования дефектов компонентов;
- разработка способов отслеживания проблемы.

СОТРУДНИЧЕСТВО, СТАНДАРТЫ И МЕТОДИКИ ТЕСТИРОВАНИЯ

Для поставщика инструментальных средств все начинается с разработки новой системы, с учетом параметров которой закупаются необходимые компоненты. На протяжении многих лет производители оборудования составляли списки предпочтительных поставщиков компонентов, которым они доверяли, а также списки поставщиков, которых следует избегать.

Производители ИС также следят за поставщиками, жестко придерживаясь внутренних стандартов закупок, что обеспечивает соответствие приобретаемых компонентов и подсистем стандартам качества. Подобные процедуры предусматривают контроль безопасности, производительности аппаратного обеспечения и соответствия его выхода строгим внутренним стандартам качества покупателя, а также контроль параметров и условий, в которых аттестуются закупаемые инструментальные средства или материалы.

Таблица 1. Перечень членов специальной группы SCIS. Источник: SEMI

Поставщики компонентов и подсистем	Поставщики оборудования	Производители полупроводниковых приборов, кремниевые заводы
Advanced Energy	Greene, Tweed	Applied Materials
AP Tech	Yoriba	ASM
ASNA	INFICON	ASML
Brooks Automation	Kashiyama	KLA-Tencor
Busch	Pall	Lam Research
Chemours	Parker/Veriflo	Tokyo Electron
ChemTrace	Pfeiffer	
CKD USA	PPE	
Comet	QEI	
DuPont	SHI Cryo	
Ebara	Swagelok	
Edwards	UCT	
Entegris	Valqua America	
Festo	VAT Valve	

Один из недостатков традиционного способа ведения бизнеса между этими участниками заключается в том, что в некоторых случаях поставщику узлов и компонентов ничего неизвестно о том, почему его продукция не соответствует спецификациям заказчика. Очевидное решение – сотрудничество, при котором стороны активно участвуют в процессе разработки продукции. Проблема заключается в необходимости делиться подробностями интеллектуальной собственности (IP), обмен которыми по базовым узлам и компонентам достаточно прост. Но при переходе к более сложной продукции (такой как технологические камеры) стороны ведут себя более осторожно. Таким образом, предприятиям полупроводниковой промышленности необходимо найти золотую середину между объемами и типами информации, которой партнерам необходимо делиться.

По мере перехода к меньшим топологическим размерам элементов требуется более четко определить характеристики компонентов и тестирования. По мнению специалистов SEMI, непонятно, как это обеспечить, поскольку отрасли пока не удается добиться координации методов измерения дефектов различных компонентов, подкомпонентов и подсистем.

Таким образом, назрела потребность в стандартизации. В сформированную в 2013 году SCIS, помимо основных производителей ИС и поставщиков оборудования, были включены поставщики компонентов оборудования (табл. 1).

Первые два года деятельности SCIS ушли на разработку методов тестирования загрязнений/примесей в уплотнителях (в единицах оборудования). С тех пор

SCIS расширила свою сферу влияния на другие критические компоненты.

Сегодня в SCIS входят семь рабочих групп (рис. 2), одна из которых – Группа по возможностям контроля (возникновения) отказов/дефектов – создает Модель информационного обмена для предоставления данных отслеживания потенциальных проблем с использованием облачных технологий.

Прогресс в области стандартизации зависит от типа компонентов. Наибольшие успехи наблюдаются в сегментах клапанов, уплотнителей, насосов, подзон в рамках заводов по обработке пластин (мини-сред) и снижения уровня загрязнений (в том числе окружающей среды). По более чувствительным к правам интеллектуальной собственности позициям (распылительным головкам и т. д.) дело идет труднее. Возможно, от опасений относительно соблюдения IP-прав не удастся избавиться, но многие подкомпоненты получили определения (для них разработана Модель информационного обмена), которые могут стать общепринятыми.

Стандарты важны для обеспечения постоянности параметров, позволяющих пользователю сравнивать сходные изделия, оценивать различия их эксплуатационных характеристик и выбирать оптимальные компоненты для технологического процесса. Производители ИС

* Cloud computing – облачные вычисления, технология распределенной обработки данных (компьютерная архитектура), в которой компьютерные ресурсы и мощности предоставляются пользователю как интернет-сервис по требованию. При этом нагрузка на входящие в облако компьютеры распределяется автоматически.

и поставщики оборудования могут обращаться к подобным спецификациям, чтобы убедиться, что их действующие и потенциальные партнеры проводят измерения так же, как они. Некоторые инициативы SCIS по разработке отраслевых стандартов представлены в табл. 2.

МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Сотрудничество, стандарты и методики тестирования – большие шаги в правильном направлении решения проблем выхода годных, изменчивости параметров процесса и устройств, сопряжения оборудования различных по мере масштабирования ИС. Однако есть и другие решения, связанные с моделированием, прогнозированием, искусственным интеллектом.

В случае возникновения проблем в условиях завода по обработке



Рис. 2. Организационная структура SCIS. Источник: SCIS, специальная группа SEMI

Таблица 2. График разработки отраслевых стандартов группами SCIS

Направление работ	Стандарт, подлежащий разработке	Статус разработки SCIS	Дата завершения	Статус стандарта	Дата завершения
Прокладки/герметизация и запирающие устройства/клапаны	Руководство по очистке уплотнителей и корпусированию/упаковке	Завершена	III кв. 2016	Опубликован	III кв. 2017
	Методы измерения скорости утечки через уплотнение	Разрабатывается	IV кв. 2017	Не опубликован	-
ВЧ-генераторы индукционного нагрева	Методы измерения переходных характеристик ВЧ-генераторов индукционного нагрева	Завершена	I кв. 2017	Готовится к публикации	I кв. 2018
Верификация выявления причин отказов	Протокол выявления причин отказов стандартных деталей	Разрабатывается	IV кв. 2017	Не опубликован	-
Критические компоненты технологических камер	Методы измерения разбрызгивающих головок - измерение при помощи масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICPMS), частицы	Разрабатывается	IV кв. 2017	Не опубликован	-
Безмасляные («чистые») насосы	Методы измерения вибрации и шумов	Разрабатывается	IV кв. 2017	Не опубликован	-
Системы подачи газов	Методы измерения уровня металлических загрязнений в системах подачи газов	Завершена	II кв. 2016	Готовится к публикации	I кв. 2017
	Методы измерения уровня углеводородных загрязнений в системах подачи газов	Завершена	II кв. 2016	Готовится к публикации	I кв. 2017
	Методы измерения уровня загрязняющих частиц при работе в импульсном режиме	Разрабатывается	I кв. 2016	Не опубликован	-
Системы подачи жидкостей	Подход к измерению уровня загрязняющих частиц в системах подачи жидкостей	Завершена	IV кв. 2016	Готовится к публикации	IV кв. 2017
	Подход к измерению уровня загрязняющих металлических частиц в системах подачи жидкостей	Завершена	IV кв. 2016	Готовится к публикации	IV кв. 2017
	Подход к измерению уровня загрязняющих органических частиц в системах подачи жидкостей	Разрабатывается	II кв. 2016	Не опубликован	-

пластин нереально проверить каждый компонент и устранить неисправность – можно запутаться в обилии данных о месте и времени появления вероятного дефекта / неисправности. Специалистам завода по обработке пластин необходимо не только исправлять неполадки оборудования, но и рассматривать проблему с точки зрения пластины. Известно, что при любой технологической операции определенные типы дефектов порождают изменения в материалах, отклонения от норм размеров и изменения мест расположения дефектов. Каждый дефект можно описать на любом этапе технологического процесса. Однако если одни дефекты приводят в негодность участок кристалла, пластины или всю пластину, то другие – нет. С учетом ограниченных ресурсов необходимо начинать с устранения первых, или так называемых «убийственных» дефектов. Важно оценивать производственную перспективу, тогда легче будет понять всю систему компонентов, подкомпонентов, подсистем и материалов.

Для этого производители ИС могут использовать несколько способов. Первый – **применение методик моделирования для прогнозирования потенциальных проблем**. Моделируя технологический процесс, можно сократить длительность циклов освоения* на физическом уровне и снизить издержки на разработку.

Другой подход – **мониторинг инструментальных средств**. В этом случае обрабатываются чистые пластины (на них не сформированы топологии, и дефекты выявляются особенно отчетливо). После прохода пластиной каждой единицы оборудования измерительные средства определяют, является ли эта единица первопричиной дефектов. Если да, то данное инструментальное средство можно вывести в автономный режим и выполнить полную и всестороннюю оценку [2].

Последним по времени освоения, но не по значению можно назвать применение искусственного интеллекта (ИИ). Производители ИС начинают **внедрять технологии ИИ в целях ускорения производственного цикла, повышения уровней управляемости, использования производственного оборудования / инструментальных средств, выхода годных и т. п.**

ИИ позволяет балансировать между непостоянным потребительским спросом и необходимостью одновременного внесения изменений в технологические процессы на заводах, разбросанных по всему миру. Подобная возможность поддерживает стремление производителей как можно быстрее достичь целевых показателей

по выходу годных, качеству, бесперебойности работы инструментальных средств. Например, благодаря технологиям ИИ корпорация Micron переносит процесс управления заводами по обработке пластин с собственно предприятий в удаленные центры.

Технологии ИИ, применяемые для управления трудовыми ресурсами, позволяют прогнозировать текучесть кадров с точностью до 95%, а также обеспечивать оптимальное взаимодействие представителей нескольких поколений работников.

Кроме того, ИИ содействует повышению эффективности циклов освоения за счет как распознавания дефектов на пластинах в начале производственного процесса, так и улучшения контроля работоспособности оборудования, что способствует увеличению выхода годных [3].

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ НА 10 / 7-НМ ТОПОЛОГИЯХ

Разброс параметров различного производственного оборудования доставляет все больше беспокойства по мере освоения производителями ИС топологических норм 10/7 нм и менее. Изменчивость параметров производственного процесса (хорошо известное явление на уровне современных топологических норм) на самом деле связана с разбросами характеристик оборудования, причем даже между установками одной модели одного и того же поставщика. Допуски на воспроизводимость размеров при переходе на более современные топологии становятся все более жесткими, поэтому к большому количеству фирм в производственной экосистеме предъявляются более высокие требования.

Для кремниевых заводов – фактических пользователей оборудования – изменчивость параметров оборудования всегда была предметом озабоченности. Ведь она может повлиять на все – от времени безотказной работы оборудования до процента выхода годных пластин (обработанных), а также рабочих характеристик ИС и производственной надежности. Производителям ИС всегда были нужны средства измерения, обеспечивающие возможность сопоставления параметров. Вариабельность параметров по мере масштабирования технологий становится все большей, что приводит к необходимости аттестации каждой новой единицы оборудования, так как она может стать фактором, ограничивающим производственную мощность всей линии.

Уменьшение разброса параметров оборудования благодаря согласованию систем и технологических камер становится очень важным для удовлетворения постоянно ужесточающихся требований. Для обеспечения воспроизводимости процессов разрабатываются новейшие методы, такие как аналитика (анализ) данных, диагностика подсистем и машинное обучение. Верификация результатов и обратная связь в реальном масштабе времени

* Learning curve – кривая обучения (освоения); отражает изменение затрат времени на единицу продукции по мере накопления опыта и внедрения более эффективных методов работы; относится к какому-л. повторяющемуся действию, выполняемому кем-л.; выражается в единицах времени, затрачиваемого на выполнение повторяющейся задачи.

с помощью новых сенсорных возможностей позволит осуществлять расширенную аналитику все большего объема информации для регулирования по выходным данным, обнаружения неисправностей, контроля изменения параметров и быстрого согласования.

Эффективное решение этой проблемы требует изменений по всей цепочке поставок, так как существует множество мелких недочетов, которые складываются в большую проблему, вбирающую в себя все, – от чистоты газов, давления в камерах травления до согласованности источников питания и даже собственно мощности (питания). В элементах цепочки поставок одни факторы более очевидны, а другие – менее.

Технологические инструменты – основной источник возникновения вариабельности параметров на пластине. Во-первых, инструменты могут приносить твердые частицы во время операций осаждения, травления или очистки. Во-вторых, возможны отклонения от основного направления процесса или нарушение равномерности этапов. Подобной несогласованностью обусловлены разброс размеров топологических элементов внутри кристалла, на пластине или от пластины к пластине, неравномерности совмещения и критических размеров. В этом кроется возможная причина возникновения множества дефектов различного типа. Технологические инструменты одного типа могут быть плохо согласованы между собой, что приводит к возникновению различий в результатах обработки пластин, прошедших через разные установки. Все это может оказывать влияние на выход годных.

Литография

Проблемы вариабельности хорошо видны на примере литографии, где один EUV-сканер отличается от другого, даже если они позиционируются как идентичное оборудование. Но на уровне топологий 10/7 нм отличия даже в 1–2 нм могут оказаться критическими.

На еще меньших уровнях топологических норм проблемы только усугубляются. На 3-нм уровне топологических норм EUV-стохастика будет оказывать воздействие на последующие за литографией этапы. Так как линии EUV-резиста служат центром для разделения шага (как спейсеры для достижения 3-нм топологии), то неравномерность краев линий может вызывать неравномерность ширины линии. Это воздействует на критические размеры, возможны ошибки установки угла кристалла в заданное положение (EPE*) (рис. 3). Для подавления переноса неравномерности с этапа литографии на спейсеры потребуются соответствующие методики. Возможно, целесообразно затратить больше времени на

формирование шага другими методами литографии, отличными от EUV-литографии.

СТАБИЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ

Все большую популярность получает идея **стабильной метрологии**, которая развивается под разными названиями. Корпорация TSMC именует ее промышленным Интернетом вещей, европейские компании – Industry 4.0. **Суть идеи – сведение к минимуму изменчивости процесса и повышение выхода годных благодаря мониторингу производственных систем на предмет изменений.**

Промышленный Интернет вещей отличается большим потенциалом. На заводы, где обработка пластин ведется по самым передовым топологическим нормам, эта технология позволяет осуществлять непрерывное считывание и мониторинг данных, обеспечивать обратную связь. При появлении отклонений производится немедленная настройка. На основе опыта внедрения промышленного Интернета вещей представители TSMC сделали вывод о том, что «ничего не является стандартным. Все персонализировано (подстроено под требования конкретного заказчика) и поэтому требует большего внимания».

Подобный подход активно поддерживают поставщики оборудования, поскольку это не только открывает для них новые возможности, но и уменьшает количество «сюрпризов» для клиентов.

На современных заводах по обработке пластин необходимо тщательно контролировать изменчивость процесса средствами мониторинга и метрологии, обеспечивая быстрый выбор корректирующих мер. В противном случае число ошибок увеличивается, они накладываются одна на другую, так как пластины остаются в процессе обработки. Это приводит к сужению окна процесса**, сокращению выхода годных и невозможности отследить источник проблемы. На новейших топологических уровнях окна процесса становятся ничтожно малыми.

Задача не ограничивается определением окна процесса, требующего метрологического мониторинга и мониторинга параметров дефектов в нескольких точках в целях быстрого выявления и корректировки изменений процесса. Для мониторинга динамического процесса важно, чтобы инструментальные средства контроля и метрологии улавливали многие типы дефектов, а также отличались устойчивостью к изменчивости процесса. И только в этом случае средства контроля будут способны фиксировать все возможные дефекты или измерять параметры,

* EPE (edge placement error) – ошибка установки угла кристалла в заданное положение.

** process window – окно процесса, набор значений параметров процесса, позволяющий изготавливать ИС и работающий при нужных спецификациях. Например, окно процесса литографии обычно определяется как набор пунктов (фокус, экспозиция и т. д.) для контроля разбросов критических размеров в пределах 10%.

даже при перемещении центра процесса. Во многих случаях системы метрологии и контроля основаны на широкополосной визуализации, что обеспечивает как широкий охват обнаружения типов дефектов (сложная метрология форм/совмещения), так и высокую устойчивость к изменчивости процесса.

ОБЩАЯ ПАНОРАМА

Мониторинг оборудования необходим, но недостаточен для понимания того, где возникают проблемы. В производстве полупроводниковых приборов существует **так много переменных, что невозможно отслеживать все отклонения и сдвиги.** В прошлом одним из способов, с помощью которого производители боролись с отклонениями, в частности с изменчивостью параметров процесса, служило формирование защитной полосы. Однако защитная полоса «съедает» площадь кристалла, а на новейших уровнях топологических норм оказывает воздействие на производительность и потребляемую мощность. Так, на уровне 14 нм использование для защитной полосы 100 мВ означает потерю 25% разности между номинальным и максимально допустимым напряжением питания и 12,5% – положительного напряжения питания транзистора. На уровне 10-нм топологий эти показатели составляют уже 33 и 14,3% соответственно при типичном пороговом напряжении 0,4 В. В результате защитная полоса больше не подходит для применения в том же качестве, в каком использовалась в прошлом, хотя проблемы, для решения которых предназначена, становятся все более непреодолимыми.

Контролировать изменение параметров процесса и т. п. становится все труднее, поэтому **новое поколение инструментальных средств предусматривает тестирование на системном уровне.** Независимо от цели тестирования (на предмет изменчивости параметров инструментальных средств, температуры или метрологии) для определения проблемы в рамках одной партии ИС данных, как правило, недостаточно. Производители вынуждены сопоставлять данные по различным партиям, чтобы выявить закономерности. При этом результат достигается не всегда.

В настоящее время под руководством SEMI **разрабатываются стандарты, определяющие, формат данных**

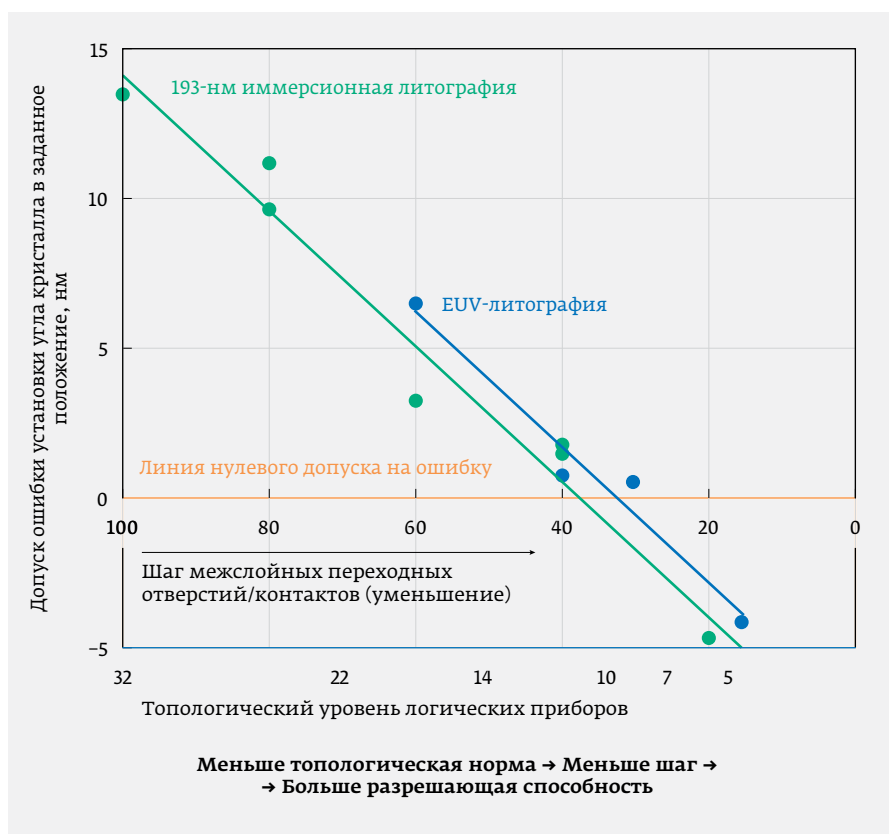


Рис. 3. ЕРЕ допуск уменьшается с каждым уровнем топологических норм.

Источник: Applied Materials

и порядок обмена ими между фирмами полупроводниковой промышленности и смежных отраслей. Многочисленные надежды эксперты связывают с аналитикой больших данных.

Освоение и развитие перспективных методик корпусирования и переход к 3D-архитектурам – еще один фактор увеличения количества проблем. Процессы / параметры могут изменяться на нескольких уровнях и кристаллах. Успешное производство приборов следующего поколения потребует от поставщиков оборудования вынести контроль изменчивости на атомарный уровень при крайне многочисленных аспектах этой задачи.

Проблема в разных ее аспектах

Решение проблем изменчивости и разброса параметров потребует использования новых подходов.

По мере масштабирования полупроводниковых технологий увеличивается число этапов технологического процесса, повышается общая сложность приборов / процессов. На этом фоне усугубляется проблема снижения изменчивости, индуцируемой процессом внутри кристалла, на пластине и от пластины к пластине. На уровне приборных структур контроль изменчивости в пределах нескольких атомов все в большей мере будет требовать

применения таких технологий, как осаждение и травление атомарных слоев.

Необходим комплексный подход: от проектирования до производства начиная с топологических проектных норм. Этот подход должен охватывать то, что происходит внутри команды разработчиков, и весь путь до производства.

По мнению представителей Semico Research, для обеспечения более эффективного производства следует выяснить, какие и сколько инструментальных средств необходимо использовать, как осуществить их интеграцию. Дело не только в производительности инструментов, не менее важно их сочетание. Для оптимального использования инструментальных средств производителям нужно найти соответствующее решение по отладке процесса на уровне завода по обработке пластин.

В этом уравнении изменчивость только один из факторов. Но на уровне топологий 10/7 нм и менее ее значение возрастает, и успешное решение вопроса может обеспечить улучшение показателя выхода годных и повысить выгоду от масштабирования [4].

* * *

Преодоление проблем, связанных с сопряжением, изменчивостью параметров и дефектами оборудования, его

компонентов и подсистем – важная задача при переходе к меньшим топологическим нормам. Работа над решением возникающих проблем ведется на разных уровнях – от поставщиков до отраслевых консорциумов (SCIC SEMI и т. д.). Основными подходами в этом плане можно считать активизацию сотрудничества и стандартизацию, моделирование, прогнозирование и искусственный интеллект.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Emmy Yi.** Smart manufacturing fuels digital transformation: Takeaways from SEMI Member Forum // Solid State Technology. The Pulse. February 02. 2018.
<http://electroi.com/blog/2018/02/smart-manufacturing-fuels-digital-transformation-takeaways-from-semi-member-forum/>
2. **Mark LaPedus.** Why Fabs Worry About Tool Parts. Semiconductor Engineering, August 17th, 2017
<http://semiengineering.com/why-fabs-worry-about-tool-parts/>
3. **Patterson A.** AI Reshaping Fab Operations // EE Times. 9/15/2017
http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1332302
4. ED SPERLING. Variation Spreads At 10/7nm. Semiconductor Engineering, November 16th. 2017.
<http://semiengineering.com/variation-spreads-at-107nm/>

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1600 руб.

НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ИНЖЕНЕРА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ МЕТОДИК ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ

Дансмор Джоэль П.

Издание осуществлено при поддержке Keysight Technologies

За последнюю четверть века в радиоэлектронной промышленности произошли революционные изменения, и немало важную роль в этих переменах сыграла техника сверхвысоких частот. Успех разработки устройств СВЧ-диапазона непосредственно связан с качеством и широтой возможностей по анализу их параметров. Автор книги – инженер-разработчик с 30-летним стажем – работал над широчайшим кругом измерительных задач в СВЧ-диапазоне: от компонентов сотового телефона до спутниковых мультиплексоров.

Написанная им книга – это совокупность основ и передового опыта, теории и практики, в центре внимания которой – измерения активных и пассивных устройств с использованием новейших методик векторного анализа цепей, в том числе конфигурации современных векторных анализаторов цепей, методики их калибровки, подходы к анализу полученных результатов измерений, неопределенностей и составляющих систематической погрешности. Значительная часть книги посвящена описанию наглядных практических примеров измерений параметров таких устройств, как кабели и соединители, линии передачи, фильтры, направленные ответвители, усилители и смесители, балансные устройства и пр.

Книга станет прекрасным практическим руководством для инженеров-метрологов и разработчиков ВЧ-/СВЧ-устройств.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2018. – 736 с.
ISBN 978-5-94836-505-3

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru